

Disertační práce

Vliv laserových operací na hodnoty aberací vyšších řádů

MUDr. Alena Feuermannová

Oční klinika Univerzity Karlovy v Praze

Lékařské fakulty v Hradci Králové

Přednosta: prof. MUDr. Pavel Rozsival, CSc.

Školitel: prof. MUDr. Pavel Rozsival, CSc.

Oční klinika Univerzity Karlovy v Praze

Lékařské fakulty v Hradci Králové

Poděkování

Děkuji prof. MUDr. Pavlu Rozsivalovi, CSc., přednostovi oční kliniky FN v Hradci Králové, který je zároveň mým školitelem, za umožnění postgraduálního studia v oboru oftalmologie a za pomoc, kterou mi v průběhu studia poskytoval. Svými cennými radami a zkušenostmi významnou měrou přispěl ke vzniku této disertační práce.

Velké poděkování patří RNDr. Ivo Komendovi, který mi významně pomohl s technickými otázkami.

Rovněž děkuji Ing. Josefu Kvasničkovi za pomoc při statistickém a grafickém zpracování dat.

Děkuji všem, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na vzniku této disertační práce.

MUDr. Alena Feuermannová

Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Excimerový laser	7
2.1	Zdroj laserového paprsku.....	7
2.2	Interakce laserový svazek – rohovka.....	7
2.3	Tvar laserového paprsku.....	8
3.	Historie refrakčních operací excimerovým laserem	9
4.	Anatomie rohovky	11
5.	Proces hojení rohovky	13
5.1	PRK.....	13
5.2	LASIK.....	15
6.	Laserové refrakční operace	17
6.1	Typy laserových operací.....	17
6.2	Indikace a kontraindikace laserových refrakčních operací.....	18
6.3	Komplikace laserových refrakčních operací.....	20
7.	Základní limity zrakového výkonu	25
8.	Wavefront analýza	27
8.1	Princip wavefront analýzy	28
8.2	Zá kroky provedené s použitím wavefront systému	30
8.3	Vliv laserových operací na hodnoty aberací vyšších řádů.....	31
9.	Cíl disertační práce	34
10.	Soubor pacientů a metodika.....	35
10.1	Předoperační vyšetření.....	35
10.2	Operační technika	35
10.3	Zpracování výsledků.....	38
10.4	Definice souboru.....	38
11.	Výsledky	41
11.1	Nekorigovaná zraková ostrost (NZO).....	41
11.2	Korigovaná zraková ostrost (KZO)	42
11.3	Refrakce	43
11.4	Hodnoty aberací vyšších řádů.....	45

11.4.1	HO RMS	45
11.4.2	Komatické aberace.....	48
11.4.3	Aberace 3. řádu	51
11.4.4	Sférická aberace.....	53
11.4.5	Aberace 4. řádu	55
11.4.6	Aberace 5. řádu	57
12.	Diskuse.....	59
13.	Odpovědi na cíl práce	65
14.	Závěr	67
15.	Seznam literatury	68
16.	Přílohy.....	78

Seznam použitých zkratk

ZO	zraková ostrost
KZO	korigovaná zraková ostrost (v anglické literatuře BCVA)
NZO	nekorigovaná zraková ostrost (v anglické literatuře UCVA)
PRK	Photorefractive Keratectomy (fotorefrakční keratektomie)
LASIK	Laser in Situ Keratomileusis
LASEK	Laser Epithelial Keratomileusis
ORK	Optimized Refractive Keratectomy
NT	nitrooční tlak
M	měsíc
Před	před operací
1 M	jeden měsíc
3 M	tři měsíce
6 M	šest měsíců
WFA	wavefront analýza
WF	wavefront
D	dioptrie
SE	sférický ekvivalent
SD	směrodatná odchylka
HOA	High Order Aberrations (aberace vyšších řádů)
RMS	Root Mean Square (kvadratická hodnota)
HO RMS	kvadratická hodnota všech aberací
SA	sférická aberace

1. Úvod

Nošení brýlí většina lidí považuje za obrovský handicap. V minulosti to bylo především z důvodů kosmetických, neboť vybrat slušivé obruby bylo mnohdy nemožné. Dnes tento důvod většinou odpadá, ale všeobecně se zvyšují požadavky na kvalitu vidění a s tím související kvalitu života. Výborný vizus se stává předpokladem úspěchů nejenom v zaměstnání, ale i při mimopracovních aktivitách.

Refrakční chirurgie je podobor oftalmologie, který se zabývá odstraněním či snížením refrakčních vad oka. Tato oblast očního lékařství se velmi rychle rozvíjí, využívá stále nové a nové technologie a díky tomu jsou operace v současné době velice bezpečné, dobře předpověditelné a stabilní. Dnes si již neklademe za cíl „pouze“ odstranit pacientovu dioptrickou vadu, ale snažíme se docílit takzvaného „supernormálního vidění“. Toho lze dosáhnout použitím individualizované ablace. Tento způsob ošetření rohovky je umožněn propojením excimerového laseru s wavefront analyzátozem, který hodnotí celkový refrakční stav oka. Při tomto typu zákroku je odstraněna nejen sférická a cylindrická vada, ale i aberace vyššího řádu. Tyto aberace, které se podílejí na výsledném vizu až 15 %, nelze korigovat běžnou brýlovou korekcí, kontaktními čočkami ani klasickou laserovou operací. Význam této zcela individuální korekce vzrůstá např. u pacientů s nepravidelnou rohovkou či decentrovanou ablační zónou po předchozích operacích.

2. Excimerový laser

2.1 Zdroj laserového paprsku

Excimerové lasery jsou pulzní lasery s plynným aktivním médiem. To je tvořeno dvěma plyny - inertním argonem a diatomickým halogenem fluorem. Tyto plyny spolu za normálních podmínek nereagují, ale pod nárazem elektrického výboje se elektrony dostávají na vysokoenergetickou hladinu do takzvaného excitovaného stavu. Atomy v tomto stavu mají schopnost se vázat a vytvářet nestabilní molekulu argon fluoridu (ArF). Tato molekula se nazývá excitovaný dimer. Při návratu elektronů na bazální úroveň vydává excitovaný dimer krátkovlnné záření a molekula se rozpadá zpět na jednotlivé atomy. Kombinace vzácného plynu a halogenu umožňuje vznik fotonů specifické vlnové délky [10]. Celý tento proces probíhá v laserové rezonanční komoře. Jako nárazníkový plyn, který zprostředkovává přenos energie, se používá vzácný plyn neon. Zdrojem energie je elektrická pumpa, která produkuje elektrické výboje o vysokém napětí. Optický rezonátor umožňuje vznikajícímu záření zpětný pohyb mezi dvěma zrcadly, přičemž každým průchodem se generované záření zesílí. Paprsek opouštějící laserovou dutinu je modelován čočkami a zrcadly, která upravují jeho průměr, homogenitu a rozložení energie.

2.2 Interakce laserový svazek – rohovka

ArF záření působí přímo na jednotlivé vazby biologických makromolekul bez termálního mezistupně. Fotony 193 nm záření s energií 6,4 eV přímo interferují s vazebnou energií C-N a C-C vazeb a rozrušují je. UV záření štěpí molekuly na 2 až 6 atomární molekulární fragmenty a uvolněné částice jsou přebytkem energie vymrštěny z místa interakce. Pro makroskopický projev tohoto děje se v literatuře vžilo označení fotoablace.

Údajem důležitým pro studium fotoablace je množství energie dopadající na jednotku plochy ozařované tkáně. Udává se v mJ/cm^2 a v anglické literatuře se pro něj používá termín fluence (tok). Prahový energetický tok, při kterém nastává v rohovkovém stromatu fotoablativní efekt, je 40-50 mJ/cm^2 . V rozsahu 50-1000 mJ/cm^2 je interakce čistou fotoablací s termokoagulační linií užší než jeden mikrometr. Při energetickém toku nad 1000 mJ/cm^2 vystupuje do popředí

termokoagulační efekt. Chceme-li předejít tepelnému poškození rohovkového stromatu, nesmí jeho teplota přesáhnout 45 °C [29]. Výsledkem ablačního procesu je hladká plocha, na jejímž povrchu je patrná elektrodenzní membrána. Tato pseudomembrána má mnoho pozitivních vlastností. Zachovává integritu rozštěpených buněk, tvoří bariéru vodnímu transportu, a zabraňuje tak edému. Navíc se ukázalo, že je schopna převzít úlohu stabilního podkladu pro rychlou a trvalou reepitelizaci.

2.3 Tvar laserového paprsku

Paprsek dopadající na rohovku byl zpočátku široký cirkulární. Ten musel být před dopadem na rohovku upraven tak, aby bylo dosaženo cílového refrakčního efektu. To bylo možné prostřednictvím diafragmatických nebo rotačních masek, které umožnily hlubší ablacii v centru. I přes rozvoj příslušenství zlepšujících ablacii docházelo ke vzniku tzv. centrálního ostrůvku [22, 54]. Tímto názvem je označována časná pooperační komplikace po myopické PRK s velkou ablační zónou. Jedná se o dobře ohraničenou plochu vysoké refrakční síly lokalizovanou v centru rohovky. Obvykle je centrální ostrůvek spojen se snížením zrakových funkcí a monokulární diplopií a jeho identifikace se provádí topograficky. Později byl zaveden do klinické praxe úzký šterbinovitý paprsek, který může rotovat po povrchu rohovky nebo se pohybovat napříč přes rohovku. Jeho hlavní výhodou je, že riziko vzniku centrálního ostrůvku je podstatně menší, povrch ablace je hladší a rovnoměrnější. To vše vede ke zvýšení kvality vidění a zlepšení zrakové ostrosti. Třetí typ laserového paprsku představuje tzv. „létající body“ (flying spots). Jde o malý paprsek o průměru 0,54-2 mm, který se pohybuje po povrchu rohovky. Jeho pohyb je řízen počítačem tak, že v centru rohovky je ablace hlubší a směrem do periferie je mělká v případě korekce myopie, u hypermetropie je nejhlubší ablace v periférii, směrem do centra hloubky ubývá, v centru je nulová. Paprsek o průměru 1 mm je teoreticky schopný odstranit většinu aberací vyššího řádu, a tak významně zvýšit kvalitu vidění jak z hlediska ostrosti, tak citlivosti na kontrast. Tento typ aplikace laseru je velmi flexibilní a umožňuje vytvářet jak sférický, tak asférický ablační profil [28].

3. Historie refrakčních operací excimerovým laserem

Technologie excimerového laseru (zkratka z anglického *excited dimer*) byla vyvinuta firmou IBM v roce 1976 a mnoho let byla využívána v průmyslu, např. při výrobě mikročipů, především pro schopnost dosáhnout velmi přesné destrukce cílové zóny se zanedbatelným účinkem na její okolí. V roce 1981 autoři Taboada, Mikesell a Reed ukázali, že epitel rohovky je mimořádně citlivý k záření o vlnové délce 193 nm, které je emitováno argon fluoridovým laserem [93]. V červnu 1983 Stephen L. Trokel ve spolupráci s fyziky uskutečnil první studii použití excimerového laseru k laserové ablaci rohovky na čerstvě enukleovaných bulbech telat pomocí různě rýhovaných masek. Rohovky pak podrobil histologické analýze. Ukázalo se, že normální struktura rohovky v okolí laserové stopy byla jen minimálně poškozena [57]. V polovině 80. let byla pozornost laboratorních studií zaměřena na zkoumání biomechanických interakcí a ultrastrukturálních změn způsobených vlivem UV záření odlišných vlnových délek na rohovku. Puliafito a kol. srovnávali kvalitu ablační zóny na prasečích a lidských rohovkách, vytvořenou argon-fluoridovým laserem (ArF 193 nm) a krypton-fluoridovým laserem (KrF 248 nm) [77]. Prokázali, že kvalita ablace zářením argon fluoridového laseru je lepší a tepelné změny v tkáni dosahovaly jen do tloušťky 0,1-0,3 μm na rozdíl od KrF, kde byly zjištěny až do hloubky 2,5 μm . Podobné výsledky publikovali i další autoři a všechny tyto zkušenosti vedly k závěru, že poškození rohovky je nejmenší při použití argon-fluoridového laseru [10, 57, 104].

První operaci na slepém lidském oku uskutečnil v roce 1985 Theo Seiler - pomocí techniky kontaktní masky vytvořil transverzální incizi ke korekci astigmatismu. O měsíc později realizoval první refrakční operaci excimerovým laserem na vidoucím oku s maligním melanomem, které bylo indikováno k enukleaci [104]. První úspěšnou operaci myopie na vidoucím oku - fotorefrakční keratektomii (PRK) - provedla Marguerite McDonald v červnu 1988.

S rozvojem použití 193nm excimerového laseru pro korekci refrakčních vad se začalo ukazovat, že zejména při korekci myopie vyšší než 6 dioptrií můžeme po PRK pozorovat signifikantní centrální rohovkové jizvy zvané „haze“, regresi refrakčního efektu a špatnou předpověditelnost [81, 89]. S ohledem na práce zkoumající

histologické změny rohovky po PRK se hledal způsob, jak se těmto nežádoucím efektům vyhnout. Jako ideální se jevila kombinace přesné laserové ablace s technikou automatizované lamelární keratoplastiky (ALK).

Za zakladatele refrakčních rohovkových lamelárních operací je považován José I. Barraquer. S prováděním těchto operací začal experimentovat kolem roku 1940 [13]. Jako první pochopil, že refrakční mohutnost oka může být změněna přidáním nebo odstraněním rohovkové tkáně [69]. Termín keratomileusis pochází z řeckého základu slov „keras“ (rohovka) a „smileusis“ (zakřivení). Jeho počáteční techniky spočívaly v seříznutí lamely v přední polovině rohovky pomocí Pauříqueova nože nebo keratomu tak, aby byl vytvořen lamelární disk rohovky. Pak se pokusil o refrakční zákrok odstraněním stromatu buď z obnažené plochy rohovky (keratomileusis in situ), nebo ze stromální plochy lamelárního disku. Keratomileusis in situ, prováděná pomocí ručního mikrokeratomu, však nebyla technicky bezpečná ani přesná. Teprve automatizovaný mikrokeratom, který v roce 1980 vyvinul L. Ruiz, otevřel dveře rozvoji lamelárních refrakčních rohovkových operací.

Termín LASIK (**L**aser in **S**itu **K**eratomileusis) nejlépe vystihuje spojení lamelární refrakční rohovkové operace a fotoablace stromatu pod rohovkovým lalokem pomocí excimerového laseru, kterou jako první provedl Pallikaris v roce 1989 na 6 slepých lidských očích. Studie na vidoucích lidských očích začaly v roce 1991 [19].

Od té doby došlo k řadě zlepšení v operační technice a v současné době jsou laserové refrakční operace považovány za standardní operační zákrok [15, 19, 20, 50, 51, 66, 82].

Na našem pracovišti provádíme laserové operace od roku 1994 pomocí postupně zdokonalovaných excimerových laserů německé firmy Schwind. Od roku 2002 používáme excimerový laser Esiris s bodovou aplikací záření (flying spot), umožňující využití wavefront analýzy ke korekci refrakčních vad. Za celou dobu jsme provedli více jak 6000 laserových zákroků.

4. Anatomie rohovky

Rohovku tvoří pět vrstev - epitel, Bowmanova membrána, stroma, Descemetova membrána a endotel.

Rohovkový epitel je mnohvrstevný, skvamózní nekeratinizující epitel, jehož tloušťka je 50-60 μm a skládá se z 5-6 vrstev buněk. Sousední buňky jsou navzájem těsně spojeny. Povrchové buňky jsou dlouhé a štíhlé, obsahují ploché jádro. Tvoří dvě vrstvy a mezi sebou jsou spojeny vazebnými můstky. Jejich přední plocha je zřasena množstvím mikrokloků, které usnadňují adsorpci mucinu a stabilizaci překorneálního slzného filmu. Buňky střední vrstvy tvoří 2-3 řady, mají nepravidelný tvar a obsahují oválné jádro. Bazální cylindrické buňky v jedné vrstvě nasedají na bazální membránu, s níž jsou pevně spojeny hemidesmozomy.

Bowmanova membrána neobsahuje buňky. Její tloušťka je 8-12 μm a skládá se z jemných kolagenních fibril, jejichž průměr je menší než průměr fibril stromatu. Je produkována buňkami bazální membrány epitelu, nemá schopnost regenerace, ostře končí na limbu a představuje důležitou bariéru pro šíření patogenů a invazivních procesů do stromatu rohovky.

Stroma rohovky tvoří 90 % její tloušťky. Je to pevná tkáň, nápadně pravidelná. Je tvořena 200-250 vrstvami plochých kolagenních lamel o tloušťce 2 μm , orientovaných paralelně s povrchem rohovky. Kolagenní lamely tvoří vysoce organizované, na sebe kolmé vrstvy, orientace lamel v jednotlivých vrstvách je navzájem posunuta o téměř 90 stupňů vzhledem k sousedním lamelám. Kolagenní fibrily jsou především typu I, III, V a VI. Prostor mezi lamelami je vyplněn mukoproteiny a glykoproteiny. Zvláštností stromatu je, že neobsahuje žádnou kyselinu hyaluronovou, pouze malé množství se nachází na limbu a její koncentrace se zvyšuje směrem ke sklěře. Mezi lamelami je přítomna trojrozměrná síť extrémně plochých fibroblastů, které se nazývají keratocyty. Tyto hvězdicovité buňky s jemnými výběžky cytoplazmy jsou zdrojem stromálního kolagenu a proteoglykanů.

Descemetova membrána je tenká homogenní vrstva mezi zadní částí stromatu a endotelem. Je 8-12 μm silná a tvoří modifikovanou bazální membránu rohovkového endotelu. Skládá se ze dvou částí, přední třetina je vrstevnatá, tvořená 30-40 kompaktními lamelami, zadní dvě třetiny jsou homogenní. Tvoří ji hlavně glykoproteiny jako laminin a fibronectin a kolagen typu IV, VIII, IX a XII.

Endotel rohovky nasedá na Descemetovu membránu. Je jednovrstevný a má pravidelnou polygonální nebo hexagonální strukturu. Má zásadní význam pro udržování hydratace a transparence rohovky. Endotel tvoří v průměru 350 000 buněk a jejich počet s věkem klesá od 4 000/ mm^2 při narození na 2 000/ mm^2 u šedesátiletého člověka. Poškození endoteliálních buněk a snížení hustoty pod 800/ mm^2 obvykle způsobí edém stromatu a pokles transparence rohovky [57].

5. Proces hojení rohovky

Přáním každého pacienta i operátora je optimálně zhojená rohovka. Po PRK to znamená, že epitel perfektně adhezuje ke stromatu a má normální tloušťku, subepiteliální stroma nevykazuje žádné odchylky od normální struktury, nejsou žádné známky regrese, jizvení, ani trvalé změny v hloubce stromatu, a zejména v endotelu. Po LASIKu je lamela hladká, obvykle není patrný ani její okraj, plocha pod lamelou je zcela čistá a nedochází ke vrůstání epitelu pod lamelu. Vzhledem k rozdílům mezi oběma typy zákroků probíhá hojení poněkud odlišně.

5.1 PRK

Hojení epitelu

Epitel představuje zevní vrstvu rohovky, a je tedy první tkání postiženou při poranění. Proces hojení rohovky je nastartován krátce po poranění epitelu tím, že se uvolní cytokiny jako interleukin-1 (IL-1) a Fas-ligand (FasL - protein strukturně podobný cytokinům skupiny TNF), které regulují apoptózu (řízenou smrt buňky), expresi kolagenáz a metaloproteináz, produkci chemokinů a tumor nekrotizujícího faktoru (TNF) alfa. Cytokiny jsou odpovědné za spuštění celé kaskády reakcí [25, 27].

Průběh hojení epitelu rohovky lze rozdělit do tří fází - fáze latentní, buněčná migrace a adheze a nakonec buněčná proliferace.

V počáteční nebo latentní fázi, která nastává po odstranění epitelu a trvá 4-6 hodin, se bazální buňky na okraji rány začínají přesouvat a pohybovat. Aby tento pohyb mohl nastat, zcela vymizí vazby mezi Bowmanovou membránou a bazálními buňkami do vzdálenosti 70 mikronů a do vzdálenosti 200 mikronů je počet vazeb značně zredukován [57, 65]. V této fázi se na povrchu poraněné plochy objevují polymorfonukleární lymfocyty, které pocházejí ze slzného filmu a odstraňují nekrotické buňky a buněčnou drť.

Ve druhé fázi (před zahájením mitóz) pozorujeme migraci buněk přes poraněnou plochu. Pohyb buněk je zprostředkován vytvářením aktinových filament, která poskytují buňkám cytoskeletární podporu, nezbytnou v této kinetické fázi. Filamenta jsou koncentrována na předních okrajích buněk a mají zásadní význam pro

pohyb buněk. Na poškozené ploše vznikají bílkoviny extracelulární matrix, ke které mohou adherovat migrující epiteliální buňky. Asi jednu hodinu po poranění se na poraněné ploše objevuje fibronectin, který stimuluje epiteliální buňky k produkci aktivátoru plazminogenu. Ten mění plazminogen na plazmin. Plazmin uvolňuje spoje mezi buňkami a mění subepiteliální matrix. Jakmile je migrace jednovrstevného epitelu úplná, pevněji se zakotvuje k bazální vrstvě a Bowmanově membráně nově syntetizovanými hemidesmozomy a dalšími kotvicími filamenty. Migrace buněk probíhá centripetálně. V případě velké centrální abraze rohovky, jaká je po PRK, se buňky pohybují z více směrů a přední okraj má konvexní tvar. Nakonec se tyto různě tvarované okraje, které uzavírají ránu, setkávají v kontaktní linii tvaru X nebo Y, která je dobře vidět na štěrbínové lampě.

Závěrečnou fází hojení epiteliálního defektu je proliferace epiteliálních buněk. Trvá do té doby, dokud epitel nedosáhne normální tloušťky. Hlavními účastníky tohoto procesu jsou bazální buňky, které pocházejí z kmenových buněk lokalizovaných na limbu. Kmenové buňky nejprve produkují rychle se dělicí buňky, nazývané přechodně zesilující buňky (transient amplifying cells - TACs), které se vztahují k bazálním buňkám rohovky. Ty se dále dělí na více diferencované buňky, označované jako postmitotické (postmitotic cells – PMCs). Podobně tyto buňky produkují konečné, plně diferencované epiteliální buňky, označované jako konečně diferencované buňky (terminally differentiated cells – TDCs).

Hojení stromatu

Stromální regenerace závisí na koordinaci interakcí mezi epiteliálními buňkami a keratocyty, při které hrají důležitou roli polypeptidové růstové faktory. Po odstranění epitelu nastává apoptóza keratocytů v zóně 200 μm od poraněné plochy [57, 102]. Apoptóza neboli řízená smrt je provázena charakteristickými změnami, jako je svrštění buněk, kondenzace a fragmentace chromatinu a vakuolizace s tvorbou buněčných fragmentů nazývaných apoptotická tělíska. Předpokládá se, že ji vyvolávají modulátory uvolněné při poranění epitelu, jako interleukiny IL-1 alfa a IL-1 beta. Buňky, které podstoupí apoptózu, na rozdíl od nekrózy, zanikají s minimálními známkami zánětu a bez uvolnění degradativních komponent, které by mohly způsobit poškození okolní tkáně [25]. Jakmile je poraněná rohovka překryta jednovrstevným epitelem, což je asi za 48-72 hodin po poranění, zbylé keratocyty se

blasticky transformují a migrují k ploše poranění. Aktivované keratocyty produkují kolageny, glykoproteiny a protoglykany, které tvoří novou extracelulární matrix stromatu. Toto zvýšení populace keratocytů vrcholí mezi 3. a 6. dnem.

Epiteliálně-stromální interakci v rohovce po PRK mohou ovlivňovat i další biologické signály, které regulují funkci buněk - hormony, cytokiny a neurotransmitery. Keratocyty vytvářejí růstové faktory a regulují rozhodující hojící a homeostatické funkce v buňkách rohovkového epitelu. Růstové faktory produkované aktivovanými keratocyty, které znovu osídlují přední stroma, tak mohou nepřímo zprostředkovat hyperplazii epitelu [103].

5.2 LASIK

LASIK je chirurgická technika, při níž je naříznuta tenká lamela rohovky pomocí mikrokeratomu a po odklopení této lamely se provede intrastromální laserová ablace rohovky. Po zákroku je lamela vrácena zpět na své původní místo. Rohovkové změny po LASIKu vznikají jednak možnou mechanickou alterací při řezu rohovky, a dále v důsledku laserové ablace [36, 61]. Stupeň mechanické alterace je závislý na kvalitě mikrokeratomu [9]. Kaufman a spol. ve své práci uvádějí, že už samotný řez rohovky vedl k poklesu denzity keratocytů jak ve stromatu lamely, tak ve stromatu rohovky a pokračoval i v průběhu dalších tří let sledování [35]. Vzhledem k tomu, že při LASIKu není odstraněn epitel a lamela vrácená na své původní místo dokonale kryje abladovanou plochu, je povrchové poranění oka podstatně menší než u PRK. Malý cirkulární defekt epitelu na okraji lamely je úplně reepitelizován během méně než 24 hodin po operaci. Přirůstání lamely nastává nejprve po jejím obvodu a teprve poté postupně přirůstá i spodní strana lamely. Hojivý proces na vytvořené styčné ploše mezi lamelou a stromatem (interface) je však nedokonalý a lamela může být snadno odklopena i po několika letech [55]. To prokazují i Stodůlka a spol., kteří studovali adhezivitu rohovkového laloku po operaci. Zjistili, že se sice postupně zvyšuje, ale i po 250-ti dnech lze lamelu poměrně lehce odloupnout. Naopak na okraji lamely lze pozorovat tvorbu jizvy [94].

Endotel

Laserové záření dopadá na povrchovou vrstvu stromatu rohovky a nepůsobí žádné krátkodobé ani střednědobé změny endotelu. Dříve, při použití excimerových laserů se širokým svazkem (broad beam), se předpokládalo, že teoreticky může být endotel poškozen vlnami po dopadu laserových pulzů na rohovku. Studie prokázaly, že endotel není po operacích rohovky excimerovým laserem poškozen [16]. Díky rozvoji nových technologií, kdy dopadající paprsek má průměr kolem 1 mm, je nepříznivý vliv excimerového laseru na endotel vyloučen.

Nervová zakončení

Jeden měsíc po LASIKu byl zjištěn pokles hustoty subbazálních nervových zakončení o 90 %. Jejich počet se postupně obnovuje a 2 roky po zákroku dosahuje 50 % předoperačních hodnot. Po PRK jsou nervová zakončení kompletně obnovena po dvou letech, kdy dosahují předoperačních hodnot [35].

6. Laserové refrakční operace

6.1 Typy laserových operací

Principem laserových refrakčních operací je remodelace přední části rohovky, a tím změna lomivosti nejen rohovky, ale celého optického systému oka. V současné době existují čtyři typy rohovkových zákroků excimerovým laserem, z nichž tři se provádějí přímo na povrchu stromatu po odstranění vrstvy epitelu a jedna, LASIK, se provádí tzv. pod povrchem, tedy uvnitř stromatu. Nejdéle používaná metoda fotorefrakční keratektomie se provádí na povrchu stromatu, po odstranění epitelu.

Fotorefrakční keratektomie je pokládána za velmi bezpečnou chirurgickou metodu pro odstranění myopie, hypermetropie a astigmatismu. Zpočátku se prováděla u všech stupňů myopie včetně vysoké myopie [2, 17, 50, 74, 75, 95, 104]. Vzhledem k nežádoucím jevům, které se v průběhu hojení začaly objevovat, jako regrese, tvorba haze [30, 79], je dnes používána pouze u nízké a střední myopie. V těchto indikacích se jedná o velmi bezpečnou, účinnou a spolehlivou metodu s prakticky nulovým rizikem pro pacienta. Její nevýhodou je velká pooperační bolestivost, která vzniká proto, že před operací je mechanicky odstraněn epitel a po provedení laserové ablace zůstává na povrchu rohovky velká rána. Úsilí o větší pohodlí pacienta a snížení bolestivosti vedlo ke snaze zakrýt velkou plochu poranění vzniklou po odstranění epitelu. Existuje možnost použít ke krytí kontaktní čočku, ale zkušenosti ukazují, že bolest se objevuje stejně a někdy vznikají zánětlivé komplikace.

LASEK – je principiálně stejná metoda jako PRK. Pomocí 20% alkoholu aplikovaného na ohraničenou část povrchu rohovky se uvolní epitel, který není odstraněn, ale pouze se shrne k okraji a po dokončení laserové ablace se tímto epitelem kryje operační rána. U tohoto typu zákroku musíme mít na paměti, že epitel, který vrátíme na poraněné stroma, se nepříhojí zpět a působí zde skutečně pouze jako krytí.

Epi-LASIK je modifikací LASEKu. Vrstva epitelu ve formě lamely je šetrně natupo odpreparována pomocí speciálního mikrokeratomu. Po provedení laserového ošetření je epitel vrácen zpět.

LASIK je technika, při níž laserový zákrok neprovádíme na povrchu stromatu rohovky, ale pod povrchem. Pomocí mikrokeratomu je seříznuta lamela rohovky o tloušťce 90 až 160 mikronů. Po jejím odklopení je uvnitř stromatu provedena laserová ablace rohovky a následně je lamela vrácena zpět na své původní místo. Tato metoda má oproti předchozím několik nesporných výhod: zákrok je v pooperačním období prakticky nebolestivý, oko zůstává po operaci odkryté, chráněné pouze průhlednou plastovou mušlí, aby nedošlo k nechtěnému mechanickému poškození povrchu oka. Zraková rehabilitace je mnohem rychlejší, na normu se obvykle upravuje během 24 hodin. Díky tomu, že na rozdíl od předchozích typů zákroků není odstraněna Bowmanova membrána, jsou reparační tkáňové procesy minimální, a tím je minimalizováno riziko tvorby subepiteliálních a stromálních jizev - haze [14].

6.2 Indikace a kontraindikace laserových refrakčních operací

Základní podmínkou pro provedení laserové operace je věk nad 18 let; k žadatelům o zákrok je však třeba přistupovat individuálně, neboť zvláště u některých 18letých chlapců je patrné, že jejich somatický vývoj ještě není ukončen a vada nejspíš nebude stabilní. Proto se za optimální nejnížší věk považuje 19-20 let.

Ojedinele jsou v naší i zahraniční literatuře publikovány práce, které popisují laserové refrakční operace prováděné za přísných pravidel u pacientů dětského věku. V ČR to byl Autrata a spol., kteří zavedli PRK u dětí ve věku mezi 4 až 15 lety při myopické anizometrii větší než 6 dioptrií. Podmínkou bylo potvrzení této vady, nesnášenlivost kontaktních čoček a plné brýlové korekce a dále předchozí důsledná a efektivní pleoptická léčba. Cílem zákroků u dětí je redukovat refrakční vadu na úroveň druhého oka, tím zlepšit snášenlivost brýlové korekce, umožnit terapii amblyopie a zlepšit KZO a binokulární funkce [7, 8, 63, 73].

K dalším indikačním kritériím patří stabilita refrakční vady minimálně 1 rok, dobrý celkový zdravotní stav a nepřítomnost jiného očního onemocnění. Přehled kontraindikací ukazuje tabulka 1.

Tab. 1: Přehled kontraindikací.

Kontraindikace laserových operací
věk nižší než 18 let
nestabilní refrakce
suché oko
záněty předního segmentu oka
keratokonus
proliferativní diabetická retinopatie
uveitidy
herpetická keratitis v anamnéze
katarakta
systemová autoimunitní onemocnění
těhotenství
pacient s kardiostimulátorem
pacient neschopný spolupracovat během léčby

Na prvních místech jsou uvedeny věk a nestabilní refrakce. Požadavky na nejnižší věkovou hranici se různí, pohybují se od 18 do 21 let, stejně tak nároky na stabilitu vady kolísající mezi jedním a dvěma roky [74, 93, 104]. Na našem pracovišti požadujeme věk starší osmnácti let a minimálně dva roky stabilní refrakci.

Mezi absolutní kontraindikace zatím stále řadíme všechna závažná celková onemocnění, která by mohla pacienta ohrozit na životě, autoimunitní a systemová onemocnění, u nichž lze předpokládat patologii v hojivém procesu, jenž by mohla vést k zánětu či rozpuštění lamely (kolagenní vaskulární onemocnění jako je revmatoidní artritida, systemový lupus erythematosus, polyartetiris nodosa a další) [45]. Smith a kol. však nedávno publikovali práci, v níž referují o provedení LASIKU na 49 očích 26 nemocných s prokázanými systemovými chorobami. U všech

pacientů bylo onemocnění dlouhodobě inaktivní nebo dobře stabilizované pomocí terapie. Během sledovací doby 1 měsíc až 5 let nezaznamenali žádnou katastrofickou komplikaci [92]. Pochopitelnou kontraindikací je monokulus. V neposlední řadě je potřeba vyloučit pacienty se špatnou spoluprací nebo nereálným očekáváním.

Relativní kontraindikací je projev atopie, imunodeficience, diabetes mellitus. Těhotné nebo kojící ženy jsou také vyloučeny, protože je zde možnost nestability refrakční vady v důsledku hormonálních změn.

Za absolutní oční kontraindikací považujeme pacienty s onemocněním předního segmentu oka, jako je „suché oko“, oko s expoziční keratopatií, klinicky prokázaný keratokonus, herpes zoster ophthalmicus v anamnéze, jizevnatý oční pemfigoid, Stevensův-Johnsonův syndrom nebo záněty předního segmentu oka.

Relativní oční kontraindikací je glaukom a neprogredující keratokonus. Laserový zákrok na oku s keratokonem stále zůstává kontroverzní otázkou. Klinicky rozvinutý a progredující keratokonus je považován za absolutní kontraindikací pro zákrok, i když je třeba zmínit práci Mortensena a kol., kteří prezentují PRK na 24 očích 23 pacientů s rozvinutým keratokonem, jež přestali snášet kontaktní čočky, nebylo možné je pro vysokou refrakční vadu zkorigovat brýlemi a byli indikováni k penetrující keratoplastice. Během průměrné sledovací doby 22 měsíců nezaznamenali progresi onemocnění ani v jednom případě. Nicméně u pacientů se středním či subklinickým keratokonem lze za určitých okolností zákrok provést [42].

6.3 Komplikace laserových refrakčních operací

Uvádíme je odděleně pro PRK a LASIK.

PRK

Časné komplikace - mezi nejčastější po ošetření rohovky fotorefrakční keratektomií patří *pooperační bolestivost a pomalé hojení*. Na nepříjemné pocity v prvních pooperačních dnech, které většinou během 2-3 dní ustoupí, je pacient předem upozorněn. I přesto je snášenlivost individuální a spolupráce ne vždy dobrá. Ke zhojení epitelu dochází obvykle během 4 dnů.

Pozdní komplikace - patří sem *neúplná korekce refrakční vady*: překorigování, podkorigování nebo regrese refrakční vady [76,79]. To lze dále řešit reoperací zbytkové vady po stabilizaci za 3 až 6 měsíců. Další komplikací je *centrální ostrůvek*, který je charakterizován jako dobře ohraničená, obvykle centrální okrouhlá nebo oválná plocha vyšší optické mohutnosti v místě ablace (3 a více dioptrií) [56]. Jeho význam spočívá v tom, že snižuje zrakovou ostrost a může být příčinou monokulární diplopie. S rozvojem nových technologií a především úzkého laserového paprsku tuto komplikaci dnes prakticky nevidíme. Stále se však můžeme setkat s *decentrací ablační zóny*, která se podílí na vzniku *vizuálních fenoménů - glare, halo, snížení kontrastní citlivosti a diplopii*. Glare a halo jsou symptomy, které vznikají při dopadu světelného paprsku na rozhraní ošetřené a intaktní rohovky. Oči s širší zornicí mají větší pravděpodobnost vzniku těchto jevů především v noci, kdy průměr zorničky výrazně zvětšuje. Od roku 2002 používáme pupilometr, který odhalí rizikové pacienty. Podle hodnot měření upravujeme velikost ablační zóny.

Specifickou pozdní komplikací po PRK je *tvorba jizvy v předním stromatu rohovky*, která je nazývána „*haze*“. Jde o hojivou reakci rohovky. Toto subepiteliální zamlžení rohovky je hodnoceno podle Gartryho čtyřstupňové škály 0 až 4 (0 = zcela čistá rohovka, 1 = slabé zamlžení detekovatelné na šterbinové lampě, 2 = slabé zamlžení viditelné při fokálním osvětlení, 3 = střední zamlžení, 4 = silné zamlžení, není možné hodnotit přední komoru a duhovku). Větší stupeň haze způsobuje regresi efektu refrakční operace, snížení ZO, pokles kontrastní citlivosti, diplopii, glare a halo [54]. Maximum haze se objevuje v průběhu druhého a třetího měsíce hojení, v šestém až osmém měsíci je stroma opět čiré. Histopatologicky je jizva tvořena nově syntetizovaným kolagenem typu III, IV, fibronectinem, lamininem a proteoglykany. Problém tvorby haze se objevoval především při korekci vysokých refrakčních vad, kdy incidence haze je úměrná velikosti korekce a maxima dosahuje zhruba tři měsíce po zákroku [30, 59]. Postupným nahrazováním PRK u těchto vad intrastromální ablací (LASIK) a fakickými nitroočními refrakčními čočkami začala tato komplikace postupně ztrácet na významu a dnes se s ní u našich pacientů prakticky neseťkáváme. Na riziko tvorby haze je však potřeba myslet při reoperaci PRK. V takovém případě lze tvorbě jizvy předejít použitím mitomycinu C [23, 44, 47, 48, 52].

UV
infekce

Zcela výjimečnou komplikaci popsali Mietz a kol. u pacienta, u něhož se po hypermetropické PRK objevily opacity rohovky, endoteliální precipitáty a fibrinová reakce v přední komoře. Histologické vyšetření rohovky odebrané při keratoplastice pak ukázalo akutní nekrózu předního stromatu [60].

LASIK

Tato metoda se skládá ze dvou fází. V první fázi je provedeno seříznutí rohovkové lamely pomocí mikrokeratomu, po jejím odklopení se provede laserové ošetření rohovky a lamela se vrátí zpět na své původní místo. S větší náročností zákroku souvisí větší množství především závažnějších komplikací **peroperačních**. Při řezu lamely může dojít ke vzniku *epiteliálního defektu až k úplné ztrátě epitelu na lamele*, což je nepříznivé z hlediska rizika vzniku difuzní lamelární keratitidy. Nejzávažnější bývají komplikace spojené s poškozením lamely, jako je její *perforace, úplné odříznutí, nedoříznutí, nepravidelná, tenká, zvrásnělá lamela*. Při vlastním laserovém zákroku může dojít k *decentraci ablační zóny* [24].

V **časném pooperačním** období (24 až 48 hodin) může vzniknout *infekční keratitida*, které je vždy třeba věnovat značnou pozornost, neboť může skončit rozpadem lamely a těžkým postižením rohovky. *Přítomnost epiteliální drti* pod lamelou může způsobit zánětlivou reakci, ale problémem, který vede ke zhoršení vidění, je *nařasení či dislokace lamely*.

Difuzní lamelární keratitida, byla poprvé popsána jako syndrom písku Sahary pro charakteristickou akumulaci infiltrujících buněk ve formě vln. Jde o neinfekční zánět, který je charakterizován migrací buněk bílé krevní řady na ploše mezi lamelou a rohovkou (interface) [91]. Obvykle vzniká 1. až 5. den po zákroku, pacienti udávají zhoršení vidění, pocit cizího tělíska nebo fotofobii. Zánět postihující interface se nešíří do stromatu lamely ani rohovky, ale neléčený může vést k rozpuštění rohovkového laloku. Etiologie může být jak endogenní (sekret Meibomských žlázek, drť ze slzného filmu, epiteliální defekt), tak exogenní (kontaminace z nástrojů, bakteriální endotoxiny či exotoxiny, lubrikant mikrokeratomu a další) [24, 46].

Mezi **pozdní pooperační komplikace** patří *vrůstání epitelu* pod lamelu, což může vést nejprve ke vzniku astigmatismu. Jestliže se tento problém neřeší, může přítomnost buněk epitelu v ose vidění způsobit výrazný poklesu vizu. *Rozpuštění*

lamely v pozdní pooperační době je naštěstí komplikací velmi vzácnou [60]. Stejně jako u PRK se setkáváme s *překorigováním* nebo *podkorigováním*. Pokud se vyskytne *regrese*, bývá obvykle spojena s nestabilitou refrakční vady v době operace nebo jsme ji pozorovali u žen s vysokou myopií po porodu. V literatuře uváděný centrální ostrůvek je díky moderním laserovým technologiím vzácná komplikace, ale můžeme pozorovat nepravidelný astigmatismus, hlavně v souvislosti s výskytem *mikrostrií* na rohovkovém laloku. *Decentrace lamely* bývá v pooperačním období většinou zapříčiněna úrazovým mechanismem, jehož následkem je vznik nepravidelného astigmatismu, glare, halo nebo diplopie.

Zvláštní kapitolu mezi pozdními komplikacemi LASIKu představuje *iatrogenní ektázie rohovky*, která je považována za nejzávažnější komplikaci. Je definována jako progresivní vyklenutí rohovky v centru nebo dolní polovině spojené s progresivním zvýšením myopické refrakční vady zároveň s postupným ztenčením rohovky [53]. Předpokládá se, že její incidence je vyšší, než se uvádí v literatuře. V roce 1998 referoval Seiler o vzniku iatrogenní rohovkové ektázie po LASIKu v případech, kdy reziduální stroma rohovky bylo tenčí než 250 μm , a v případech frustní formy keratokonu [83, 84, 85]. Příznaky ektázie se objevují mezi 1 a 45 měsíci po operaci. Ve více než polovině publikovaných případů se zjevná ektázie objeví po více než jednom roce po zákroku. Oboustranně vzniká keratektázie ve dvou třetinách případů [87]. I když mechanismus jejího vzniku není zcela jasný, předpokládá se, že po LASIKu jsou narušeny biomechanické vlastnosti rohovky. Lamela, kterou lze i šest let po zákroku odpreparovat, k obnovení pevnosti rohovky nepřispívá. To znamená, že po zákroku má rohovka určitou tloušťku, ale na její elasticitu má vliv pouze tloušťka reziduálního stromatu. Rohovka je po zákroku mechanicky ztenčena jednak naříznutím lamely, jednak odstraněním tkáně během laserového ošetření. To způsobí, že i normální nitrooční tlak způsobí vyklenutí ztenčené rohovky. Stále není zcela jasné, jaké množství reziduální tkáně je nezbytné pro prevenci vzniku ektázie. Navrhováno je 250 μm nebo alespoň polovina původní tloušťky rohovky [40, 84]. Pallikaris a spol. nezaznamenali vznik ektázie v souboru 2 873 případů LASIKu s reziduální tloušťkou stromatu větší než 325 μm , což

podporuje předchozí návrh [70]. Kohnen shrnuje nejdůležitější kroky pro prevenci ektázie do několika bodů:

1. Pečlivě posoudit předoperační topografii a keratometrii.
2. Vyhnout se LASIKu u očí s abnormálním nebo podezřelým nálezem na topografu.
3. Spočítat předpokládanou reziduální tloušťku rohovky na základě její předoperační tloušťky, množství odstraněné tkáně a tloušťce lamely.
4. Měřit tloušťku lamely a reziduální tloušťku rohovky peroperačně [37].

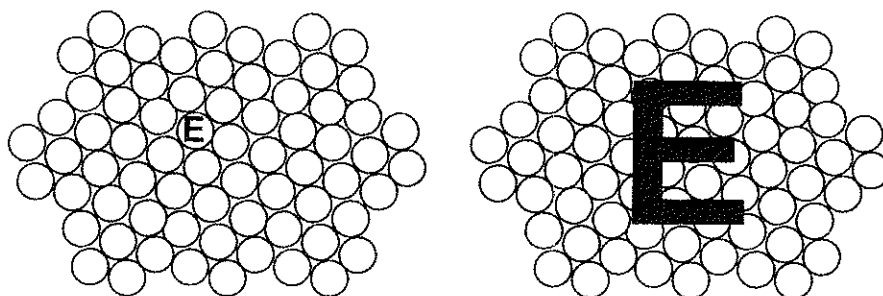
Seitz zdůrazňuje, že předoperační tloušťka rohovky menší než 500 μm a/nebo přítomnost topografických známek frustní formy keratokonu jsou největší rizikové faktory pro vznik keratektázie po LASIKu [87].

U PRK i LASIKu se po operaci užívají kortikosteroidy, které u některých pacientů mohou způsobit přechodné zvýšení *nitroočního tlaku*. Proto při každé kontrole měříme nitrooční tlak aplanačním nebo bezkontaktním tonometrem.

7. Základní limity zrakového výkonu

Vidění je komplexní proces, který může být rozdělen na dvě části - část optickou a proces nervového zpracování. Vlastnosti optického systému a laserové operace spadají do optického procesu, přepis retinálního obrazu na nervový vjem je nervový proces. Obě součásti však spolu úzce souvisí a na sebe navazují. Kvalita vidění je nejvyšší tehdy, když sítnicový obraz zcela koreluje s pozorovaným předmětem [21].

Kromě optických předpokladů je pro zrakový výkon velmi podstatná schopnost sítnicových fotoreceptorů vytvářet retinální obraz. Ve foveole mají fotoreceptory v průměru asi 2 až 2,5 μm . Mechanismus vzniku odpovědi fotoreceptorů na vstupní signál je založen na pohlcení fotonu nesoucího obrazovou informaci ve fotoreceptoru. Je-li velikost pozorovaného předmětu natolik malá, že jeho obraz padne do jednotlivého fotoreceptoru, ztrácí se prostorová informace o předmětu. Měli mít vizuální systém schopnost rozlišit dostatečně kvalitně pozorovaný předmět (např. některý z optotypových znaků), je nutno, aby jeho obraz aktivoval adekvátní počet fotoreceptorů - viz obr. 1.



Obr. 1: Fotoreceptorová mozaika.

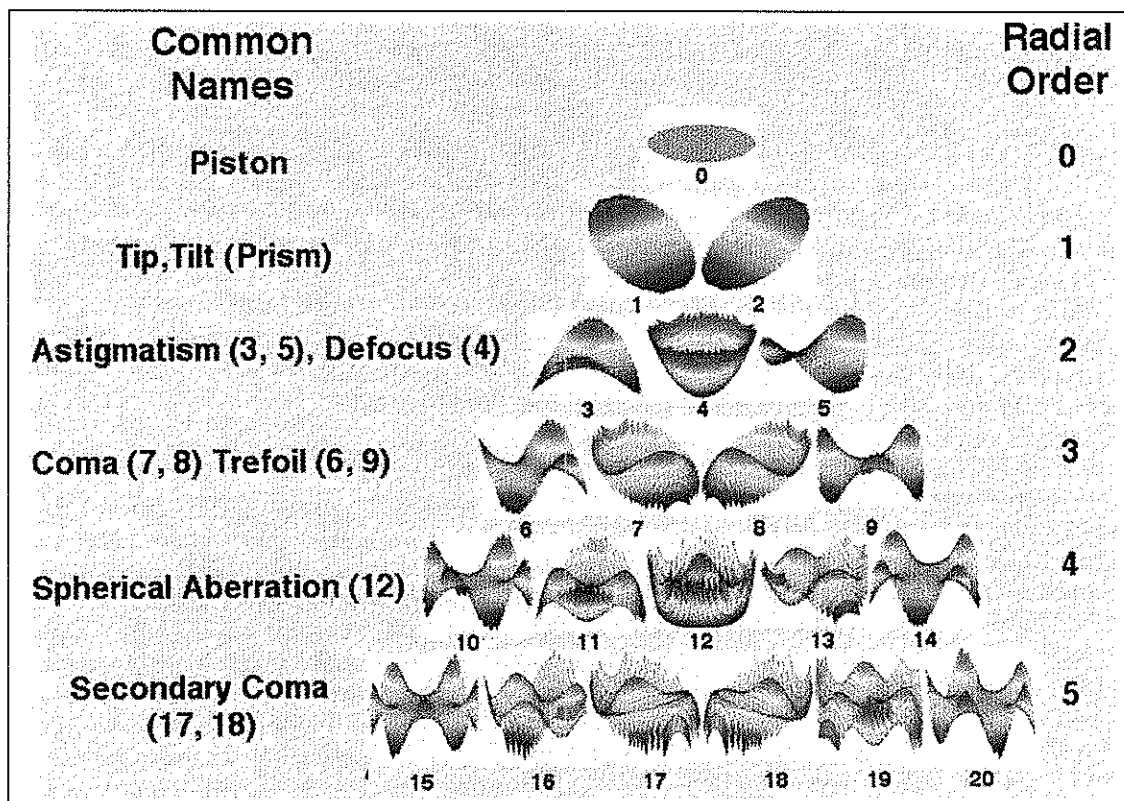
Individuální hustota foveolární fotoreceptorové mozaiky tedy omezuje zrakovou ostrost nezávisle na kvalitě optického systému oka někde mezi hodnotami 2,0 až 2,5 ($6/3 - 6/2,5$). Vyjádřeno v hodnotách odpovídajících prostorových frekvencí 75 cyklů/stupeň až 60 cyklů/stupeň neboli log MAR -0,4 až -0,3. Při velikosti pozorovaného předmětu o prostorové frekvenci vyšší než 75 cyklů/stupeň

není jeho obraz CNS věrně vyhodnocen, což způsobí deformaci obrazu vůči předmětu. Je důležité si uvědomit, že výše uvedené retinální limity, odvozené čistě matematicky z individuální velikosti fotoreceptorů, nelze interpretovat jako neschopnost oka pozorovat předmět s drobnými detaily, nýbrž jako neschopnost vizuálního systému reprodukovat takovýto předmět věrně. Oko sice předmětové drobné detaily o velikosti větší než 75 cyklů/stupeň rozeznává, ale jejich obraz se od reality liší. Tato skutečnost se často označuje jako tzv. falešné rozlišení. U opticky ideálního oka představuje pro větší velikosti zornice individuální hustota fotoreceptorové mozaiky zásadní limit zrakové ostrosti. Jinými slovy: ani odstraněním všech aberací u reálného oka nemůžeme pro větší velikosti zornice dosáhnout vyšší než limitní zrakové ostrosti, můžeme však významně vylepšit kontrastní citlivost [4].

8. Wavefront analýza

Wavefront analýza lidského oka je založena na optické teorii, která byla vyvinuta v astronomii před více než sto lety, ale jejíž kořeny sahají do období před 400 lety [72]. Astronomové tuto teorii používali k redukci aberací vyšších řádů (higher order aberrations HOA) indukovaných zemskou atmosférou. Rozpoznání možností této analýzy v oční refrakční chirurgii vedlo k vyvinutí wavefront analyzátorů. Možnost změření všech aberací přítomných v lidském oku a propojení wavefront technologie s laserovými systémy umožňuje zlepšit výsledky laserových operací a zaměřit se na aberace vyšších řádů.

Aberace jsou děleny podle Zernikeových polynomů do řádů, jichž může být teoreticky nekonečně mnoho. Z praktického hlediska se omezíme na maximálně pátý řád - Z1 až Z20. První řád Z1 a Z2 určuje prisma nebo náklon. Druhý řád Z3 až Z5 vymezuje sférocyklindrickou refrakci, Z7 a Z8 určuje aberaci třetího řádu nazývanou *koma*, Z12 představuje aberaci čtvrtého řádu, která se nazývá *sférická aberace*. Aberace pátého a vyššího řádu popisují sekundární komu a další komplexnější stavy. Pro myopii, hyperopii a astigmatismus je odchylka změřené vlnoplochy od ideální roviny úplně reprezentována polynomy druhého řádu, proto mluvíme o aberacích druhého řádu. Podle stejného principu je koma aberací třetího řádu a sekundární sférická aberace je řádu čtvrtého [41]. Pro označení jednotlivých polynomů se používají dva základní způsoby. První, který jsme použili výše, představuje jednoduchý index - písmeno Z nebo C plus číslice označující pořadí polynomu v Atlase Zernikeových polynomů, např. Z4 označuje defokus, viz obr. 2. Druhým způsobem je použití dvojitého indexu, kdy první číslo v závorce uvádí radiální řád a druhé angulární frekvenci, takže defokus je označen Z(2,0). V literatuře se nejčastěji se používá horní a dolní index, kdy dolní index znamená řád a horní index úhlovou frekvenci. Znak pro defokus je tedy Z_2^0 . Ve předložené práci budeme nadále používat toto označení.



Obr. 2: Zernikeovy polynomy.

8.1 Princip wavefront analýzy

Ve fyzikální optice je světlo považováno za vlnění. Šíří-li se světlo ze světelného zdroje homogenním prostředím, dospěje za libovolně zvolený čas v každém směru do určitého bodu. Spojnice těchto bodů se nazývá vlnoplochou. Vlnoplocha vystupující z ideálního neakomodujícího emetropického oka má tvar roviny kolmé k ose vidění. Vlnoplocha vystupující z normálního (reálného) oka není rovinná, ale je deformovaná, přičemž míra deformace vypovídá o optické kvalitě oka. Aberace vlnoplochy je definována jako odchylka aktuální vlnoplochy od vlnoplochy ideální, a to v rovině výstupní pupily oka. Odchylka vlnoplochy je kvantifikována výpočtem střední kvadratické hodnoty - RMS (root mean square) - této odchylky při určitém průměru zornice. Obojí, jak větší odchylka, tak širší

zornice, vyústí ve větší hodnotu RMS. V optice jsou aberace děleny na monochromatické a chromatické.

Monochromatické aberace jsou aberace přítomné pro specifickou vlnovou délku viditelného světla. Celkovou aberaci můžeme rozložit do mnoha (teoreticky vzato nekonečně mnoha) elementárních komponent (= Zernikeovy polynomy). Jinými slovy - poskládáním určitých elementárních komponent, z nichž každá představuje konkrétní „množství“, dostaneme konkrétní aberaci oka, a tedy informaci o optické kvalitě konkrétního oka. Elementární komponenty navenek vykazují logickou strukturu, umožňující členit je podle charakteru, jakým se projevují. Některé z nich jsou přímo pojmenovány, poněvadž korelují s historicky známými optickými jevy, některé jsou pouze číslovány. Tak např. primární sférická aberace (defokus) a astigmatismus jsou považovány za aberace nižších řádů a mohou být korigovány klasickými pomůckami - brýlemi, kontaktními čočkami a refrakčními operacemi. U očí s normální distribucí aberací tvoří přibližně 85 % refrakčních vad oka naměřených wavefront analyzátořem. Koma, sférická aberace a další termíny jsou používány k popisu určitých aberací vyššího řádu. Tyto vady nemohou být korigovány sférocyklindrickými čočkami ani klasickými refrakčními operacemi. Představují přibližně 15 % WF aberací. Koma se projevuje asymetrickou odchylkou oproti ideální vlnoploše. Na emetropické ploše tvoří tvar podobný kometě. Sférické aberace způsobují symetrickou odchylku od ideální vlnoplochy, přičemž tato odchylka je přibližně sférická v centru zornice a směrem k periferii se zakřivení mění. Vnější projevem takové aberace je koncentrický prstenec kolem ohniska a výsledkem je zobrazení bodu se světelnými kruhy kolem. Také všechny další aberace vyšších řádů mohou být rozděleny podle deviací od ideální vlnoplochy [31].

Chromatické aberace jsou vady způsobené disperzí v optických elementech oka. Disperze je změna indexu lomu materiálu pro různé vlnové délky světla a způsobuje rozložení bílého světla do různých barev spektra. Refrakčními operacemi nemohou být chromatické aberace korigovány, protože tato vada spočívá v optických vlastnostech jednotlivých tkání oka a ne v jejich geometrickém tvaru.

8.2 Zákroky provedené s použitím wavefront systému

poskytují oproti konvenčním laserům některé výhody. Výsledky jsou přesnější, dochází k menší indukci HOA, zlepšení vidění, zlepšení citlivosti na kontrast, zmenšení halo a glare efektu.

V současné době se používají dva základní typy zákroků pomocí WFA.

- „wavefront-guided“ - používá změření všech aberací oka včetně aberací vyšších řádů a na základě výsledku vytvoří ablační plochu, která je specifická pro dané oko. Cílem je redukovat všechny preexistující aberace, aniž by byly indukovány aberace nové. Data z klinických studií však ukazují, že u většiny případů není odstranění předoperačních aberací úplné. Nicméně „wavefront-guided“ zákroky indukují ve srovnání s klasickým typem operace podstatně méně HOA, což vede ke zlepšení kvality vidění pacienta.
- „wavefront-optimized“ - zákrok si neklade za cíl odstranit ani redukovat preexistující aberace, ale je zaměřen na prevenci indukce aberací, zejména sférické aberace. Z celkových aberací, které jsou klasickou operací indukovány, je nejvýznamnější právě sférická aberace, která u některých pacientů vyústí v glare, halo a mlhavé vidění, zejména za zhoršených světelných podmínek. Tento přístup je založen na skutečnosti, že 80-90 % klientů má jen nevýznamné množství předoperačních HOA. Proto se považuje za přínosnější tímto typem zákroku chránit předoperační kvalitu vidění.

Otázka, který z těchto typů zákroků je lepší, zatím zůstává nezodpovězena a očekává se, že budou potřeba další studie. Význam „wavefront-guided“ zákroků však stoupá u pacientů s nepravidelným astigmatismem. Tito nemocní tvoří mezi zájemci o refrakční operace pouze malé procento.

Věda ovšem nezůstává na jednom místě, proto dnes máme k dispozici nový typ profilu laserového svazku, tzv. asférický. Tento typ profilu laserového svazku dovoluje dosáhnout zlepšení optické kvality oka optimalizací asféricity rohovky. Asféricitu rohovky udává Q-faktor, jehož hodnota v normální populaci je kolem -0,25, což ukazuje na lehce protáhlý tvar rohovky. Schwiegerling upozorňuje, že optimální hodnota Q-faktoru by měla být kolem -0,4 [90]. Zákrok je založen

na vytvoření optimálního tvaru rohovky pomocí Q-faktoru, bez ohledu na sférickou aberaci [39].

V současné době neexistuje studie, která by zhodnotila výhody, nevýhody a dlouhodobou stabilitu jednotlivých typů zákroků. Není tedy stanoven ani optimální profil, ani pravidlo, jaký typ profilu by na které oko měl být použit.

8.3 Vliv laserových operací na hodnoty aberací vyšších řádů

Moderní rohovkové laserové operace se zaměřují na individuálně přizpůsobenou ablací (custom ablation), jejíž cílem je zlepšení optických a zrakových výsledků. Nevýhodou klasické neboli běžné fotorefrakční léčby myopie a hypermetropie je pozorované zvýšení aberací vyšších řádů po operaci. Studie založené na zkoumání rohovkových aberací, celkových aberací a zrakovém výkonu po standardním zákroku ukazují, že kvalita nejlepšího obrazu po rohovkové laserové operaci klesá. Důvody pro pozorovaný nárůst aberací vyšších řádu jsou různé.

- Nedokonalost algoritmu distribuce laserové energie, nezohledňující Fresnelovy ztráty způsobené změnou odrazivosti směrem od optické osy k periférii a změnou geometrie účinné plochy laserové energie. Změny hloubky ablace při každém laserovém pulzu paprsku pohybujícího se od vrcholu rohovky směrem k limbu - mění se úhel dopadajícího svazku, což způsobuje významný pokles účinku v periférii, a tím signifikantní podkorigování periferie, následkem je vznik sférické aberace. Na tento efekt je pamatováno v moderních softwarových programech řídících aplikaci laserového svazku na rohovku. K dostatečné úpravě optických aberací je potřeba laserového paprsku o průměru 0,5 - 2 mm. Nesprávný algoritmus může naopak indukovat další typy aberací vyššího řádu.
- Dehydratace nebo hydratace rohovky. Rohovka se po odstranění epitelu nebo zvednutí lamely dehydratuje. Snížení obsahu vody vyústí ve vyšší účinnost ablace na kolagenní struktury, a tím dosažení větší ablační hloubky. Při větším obsahu vody může být laserové záření zastíněno jemným vodním filmem po čišťení stromatu rohovky vodou před ablací a jeho účinnost se snižuje.

- Posunutí ablační zóny vzhledem k ose vidění je po laserových operacích náročný problém. I malá decentrace o 0,1-0,2 mm může indukovat HOA, které negativně ovlivní zrakový výkon. Tento problém pomáhají překonat moderní „eye-tracking“ systémy.
- Lamelou indukované aberace. Tvorba lamely během LASIKu může modifikovat přirozené HOA, zejména sférickou aberaci a komě podobné aberace především podél horizontální osy [71].
- Pooperační ztlustění epitelu. Po PRK a LASIKu se může tloušťka epitelu zvětšit oproti předoperačnímu stavu, snížit požadovanou korekci a indukovat HOA.
- Biomechanické změny. Rohovka má vrstevnatou strukturu, je složena z mnoha lamel, které se klenou od limbu k limbu. Jejich napětí je dáno nitroočním tlakem. Po laserové ablaci jsou tyto lamely trvale poškozené. Řez lamely způsobí uvolnění matrix, která se rozšíří a výsledkem je hyperopický posun. Tato skutečnost musí být zakalkulována do ablačního profilu [62].

Cílem „WF-guided“ refrakčních operací je zlepšení zrakových funkcí minimalizací RMS chyby. Redukce optických aberací při široké zornici na nulu poskytne lepší retinální obraz, nicméně takový výsledek je nerealistický nebo nedosažitelný. Krátkodobým cílem refrakčních operací je neindukovat nové aberace při korekci sféry a cylindru (defokus a astigmatismus) a dlouhodobějším cílem je nejen neindukovat, ale zároveň rutinně minimalizovat existující aberace vyšších řádů.

Jak je výše uvedeno, v současné době disponujeme přístroji, které nám umožňují změřit kompletní refrakční stav oka včetně aberací vyššího řádu jak celkových, tak rohovkových, známe limity vidění, nicméně vliv HOA na výslednou zrakovou ostrost stále zůstává nejasný. Naopak se zdá, že čím více znalostí máme, tím více nových otázek vyvstává. Počáteční očekávání, že odstraněním aberací vyšších řádů dosáhneme „super“ vidění, se nenaplnila, neboť stále existuje řada limitujících faktorů. Laserový zákrok podle wavefront analýzy je považován za individuální ablací, zákrok je tedy proveden podle pacientových aberací. Nicméně i tyto operace mohou vést k nepředpověditelným výsledkům, k nimž přispívají právě ony limitující faktory. Mezi ně patří hojení rohovky, biomechanické vlastnosti rohovky

a v neposlední řadě kombinace jednotlivých aberací vyšších řádů a individuální schopnost mozku vyhodnocovat obraz realizovaný optickým systémem oka [1]. Interakce různých aberací mohou vést jak k lepšímu, tak k horšímu vizu. Levy a kol. ve své práci hodnotili HOA u očí se supernormálním viděním (KZO 1,3 a lepší) a nezjistili statisticky významný rozdíl mezi wavefront aberacemi a refrakční vadou ve srovnání s normálníma očima [49].

Vliv aberací vyšších řádů na zrakový výkon je komplexní a dosud není zcela objasněn. Podle dosavadních výsledků by snad všechny aberace neměly být laserovými zákroky odstraněny, protože jejich nežádoucí vliv není zcela jasný a může se lišit podle jejich typu a hodnoty. Více pozornosti bude třeba věnovat vztahu mezi aberacemi vyšších řádů a zrakovým výkonem a bude potřeba přezkoumat jejich klinickou důležitost. V současnosti je obecně přijímána praxe nealterovat aberace vyšších řádů u pacientů, jejichž KZO se sférocylindrickou korekcí je 1,0 a lepší.

V předložené disertační práci jsme se pokusili přispět k poodhalení některých nejasností v této málo známé oblasti.

9. Cíl disertační práce

Cílem práce bylo zhodnotit aberace vyšších řádů u pacientů, kteří podstoupili refrakční laserovou operaci.

Laserový zákrok byl proveden dvěma způsoby. V prvním případě se jednalo o PRK a ve druhém případě o LASIK. U obou typů operací jsme zákrok provedli buď tzv. standardním způsobem za použití klasické Munnerlynovy formule (pacientovi byla odstraněna sférická a cylindrická vada, která odpovídala jeho subjektivně nejlepší brýlové korekci), nebo byl zákrok proveden podle wavefront analýzy.

Hodnotili jsme nekorigovanou i korigovanou zrakovou ostrost, aberace nižších řádů, tedy sférickou i cylindrickou refrakční vadu, a aberace vyšších řádů. Z těch jsme se zaměřili na RMS celkových aberací vyšších řádů (HO RMS), RMS primární komy, celkové komy (třetího a pátého řádu), aberací třetího řádu, sférické aberace, čtvrtého řádu a pátého řádu. Hledali jsme statisticky významné rozdíly v těchto hodnotách mezi skupinami operovanými klasicky a podle wavefront analýzy a zároveň hodnotili jejich vývoj jeden, tři a šest měsíců po zákroku.

10. Soubor pacientů a metodika

10.1 Předoperační vyšetření

Každý pacient předoperačně podstoupil komplexní předoperační vyšetření: nekorigovaná zraková ostrost (NZO), zraková ostrost s nejlepší korekcí (KZO), autorefraktometr (Nidek AR 600A), Schirmerův test I, vyšetření předního segmentu na šterbinové lampě, měření nitroočního tlaku bezkontaktním nebo aplanačním tonometrem (NT 2000 Nidek), pachymetrie (Ultrasonic Pachymeter UP-1000) a endoteliální mikroskopie (CONAN ROBO PACHY). Vyšetření očního pozadí v mydiáze je nutné hlavně u nemocných s myopií kvůli možným degenerativním onemocněním sítnice. Samozřejmostí je zhodnocení rohovkové keratotopografie, která umožňuje posoudit rohovkový astigmatismus a identifikovat pacienty s počínajícím nebo suspektním keratokonem.

Vyšetření rohovkových aberací bylo provedeno na keratotopografu (Keratron SCOUT, SCHWIND eye-tech-solution), jehož součástí je rohovkový wavefront analyzátor. Zhodnocení předoperačních aberací je důležité zejména u pacientů s nepravidelným astigmatismem a může vést k plánování určitého typu operace. V pooperačním období slouží k odhalení některých typů aberací, které mohou způsobit zhoršení vidění. Kromě těchto základních vyšetření jsme v případě potřeby provedli další doplňující testy jako perimetrii, biomikroskopii, strabologické vyšetření a jiná.

Nedílnou součástí předoperačního vyšetření byl pohovor lékaře s pacientem o důvodech, které ho přivádějí, a co od operace očekává. Klient byl informován o jednotlivých chirurgických postupech, jejich výhodách i nevýhodách a možných komplikacích. Presbyopičtí pacienti byli uvědoměni, že po zákroku bude nutná brýlová korekce na čtení. Na závěr byl nemocný poučen o průběhu operace a pooperační léčbě.

10.2 Operační technika

Operace byly prováděny dvěma operátory (A.F. a P.R.) na speciálním operačním sále, který je určen pouze pro tyto účely.

Před operací PRK jsme vkapávali anestetikum Novesin 3x po 10 minutách, dále nesteroidní antiflogistikum, eventuálně i miotikum Pilocarpin 2%. Po příchodu na sál byl pacient uložen na laserové lůžko a bylo zalepeno neoperované oko, aby ho nerušilo při zákroku. Těsně před operací byl naložen víčkový rozvěrač a byla provedena mechanická abraze epitelu v zóně o 1 mm větší, než je průměr zvolené ablační zóny. Obnažené stroma jsme opláchlí, osušili a ihned provedli laserový zákrok.

Před operací LASIK jsme pacientovi vkapávali anestetikum až po příchodu do laserové místnosti, kdy bylo opět zakryto neoperované oko. Na oko byl před zákrokem nasazen rozvěrač a pomocí markeru s metylénovou modří nebo speciálním rohovkovým fixem byly na rohovce označeny orientační body. Na naší klinice používáme mikrokeratom firmy Schwind Supratom. Skládá se ze dvou částí - sukčního prstence a hlavice mikrokeratomu, kterou tvoří motorek a speciální nůž. Sukční prstenec se nasadí na bulbus a pomocí vakua se pevně přisaje. Na prstenci se nachází čep, na nějž se opatrně nasadí druhá část mikrokeratomu – motorek se speciálním nožem. Během řezu hlavice s nožem přejede obloukovitým pohybem přes rohovku a dojde k vytvoření lamely, v našem případě o tloušťce 160 mikrometrů. Poté je uvolněno vakuum a mikrokeratom se z oka odstraní. Šetrně je odklopena lamela rohovky a uprostřed stromatu je provedena laserová ablace. Během výkonu je nutné zachovat povrch stromatu čistý a nesmí dojít k předčasné hydrataci laserované plochy. Vzniklý edém by mohl vést k podkorigování nebo vzniku nepravidelností v optické zóně. Po dokončení laserové procedury následuje výplach a definitivní očištění. Cílem je odstranění nečistot, které by mohly ulpět v prostoru mezi lamelou a stromálním lůžkem. Po dokončení této „čistící“ fáze je lamela vrácena zpět na původní místo. K její přesné orientaci slouží značky na rohovce, které byly nanесeny na začátku zákroku. Doba potřebná k přilnutí lamely se pohybuje kolem 2 minut. Následně je vyjmut rozvěrač a oko necháváme volně, tedy bez použití kontaktní čočky.

Všechny zákroky jsme provedli na excimerovém laseru firmy Schwind Esiris. Bylo použito záření o vlnové délce 193 nm, hustota energie byla 800 mJ/cm², délka impulzu 8 ns, pulzní frekvence 200 Hz. Průměr ablační zóny jsme volili mezi 6-7 mm, přechodní zónu 0-1 mm. Při ORK ošetření (Optimized Refractive

Keratectomy - zákrok je provedený podle wavefront analýzy) je velikost přechodné zóny nastavena automaticky. U obou metod je použit paprsek o průměru 0,9 mm s „flying spots“ algoritmem, avšak u metody ORK se jedná o asférický profil, zatímco u standardního zákroku je profil sférický, založený na klasickém Munnerlynově vzorci. Zaostření na vrchol rohovky se provádí pomocí naváděcího paprsku, který je generován diodovým laserem o vlnové délce 635 nm. Pacient během zákroku sleduje blikající červené světlo, které tvoří tzv. fixační paprsek. Jde opět o diodový laser, tentokrát o vlnové délce 670 nm. Během zákroku je zapnut tzv. „eye tracker“, systém aktivního sledování, který registruje pohyby bulbu a v reálném čase je kompenzuje. Pokud dojde k většímu pohybu bulbu, emise záření se automaticky zastaví.

Bezprostředně po operaci PRK jsme do oka instilovali antibiotikum (Gentamicin 0,3%), nesteroidní antiflogistikum (Voltaren) a krátkodobé mydriaticum (Mydrum), perorálně dostal pacient analgetikum (Tramal, Paralen). Oko bylo kryto kompresivním obvazem, který byl ponechán 3-4 dny. Po tuto dobu nemocný aplikoval lokálně antibiotika v kapkách každé dvě hodiny během dne. Pro případ bolesti operovaného oka dostal pacient analgetika a jednu tabletu hypnotika na první noc.

Po operaci LASIK jsme ještě na operačním stole vkápli antibiotikum (Gentamycin 0,3%). Dále nemocný pokračoval v kapání antibiotika každé dvě hodiny během dne. Léky proti bolesti a na spaní dostal pacient stejně jako po PRK.

První kontrola po PRK byla třetí až čtvrtý den. První týden pacient aplikoval lokálně antibiotikum (Gentamicin 0,3%), po kompletní reepitelizaci povrchu rohovky jsme přidali fluorometholon 0,1% gtt lokálně (Flucon, Efflumidex). Dávka byla zpočátku 3-4krát denně, při každé kontrole byla individuálně upravena. Celkově byly kortikosteroidy kapány asi čtyři měsíce.

První kontrola po operaci LASIK byla hned druhý den, kdy jsme k lokálnímu antibiotiku přidali fluorometholon 0,1% 4x denně. Instilace kortikosteroidů byla v tomto případě podstatně kratší - trvala v průměru tři týdny.

Další kontroly byly prováděny první, třetí a šestý měsíc po zákroku. Součástí každého vyšetření bylo zjištění NZO, KZO, subjektivní korekce, vyšetření na autorefraktometru, kontrola předního segmentu oka na štěrbinové lampě, u PRK

zhodnocení haze, po LASIKu kontrola lamely včetně interface, změření nitroočního tlaku, provedení keratotopografie, endoteliální mikroskopie, případně byla indikována jiná další doplňující vyšetření dle potřeby.

10.3 Zpracování výsledků

Disertační práce vznikla na podkladě zhodnocení výsledků operací pacientů excimerovým laserem. Operace probíhaly v době od ledna 2003 do prosince 2006, zákroky provedli dva operatéři (A.F., P.R.). Všechny sledované parametry byly zadávány do počítačového programu Datagraph, do něhož jsme přímo přetransformovali data z rohovkového wavefront analyzátoru. Následně byly hodnoty převedeny do programu Excel a provedena statistická analýza. Pro statistickou analýzu byl použit software SYSTAT, pro porovnání proměnných mezi skupinami byly užity testy Kuskalův-Wallisův, Wilcoxonův test a Mannův-Whitneyův U test. Hodnoty pravděpodobnosti jsou zaokrouhlené, takže hodnota $p = 0,000$ znamená, že $p < 0,0005$. Rohovková wavefront chyba byla počítána jako odmocnina kvadratických hodnot Zernikeových polynomů při velikosti zornice 6 mm.

10.4 Definice souboru

Do souboru byly zařazeni pacienti operovaní na naší klinice v období od 1. 1. 2004 do 31. 8. 2006. Celkem se jednalo o 213 očí 120 nemocných, z toho bylo 72 žen a 48 mužů.

Operace byly provedeny dvěma způsoby - metodou PRK a metodou LASIK. PRK byla volena u pacientů s nízkou myopií, LASIK u nemocných se střední a vyšší myopií. Ve všech případech se jednalo o primární operaci. Průměrné předoperační hodnoty refrakční vady se u obou metod od sebe lišily, proto jsme jednotlivé metody hodnotili odděleně. Dalším důvodem pro oddělené zpracování bylo i to, že při LASIKu již pouhé seříznutí lamely vede ke změně hodnot aberací vyššího řádu, proto by obě skupiny nebyly vzájemně srovnatelné [71]. Pacienti byli rozděleni do skupin podle typu provedené operace (PRK nebo LASIK) a dále podle způsobu

operace - standardně, tedy s použitím sférického profilu ablace, nebo s použitím wavefront analýzy – ORK (Optimized Refractive Keratectomy). U všech klientů jsme sledovali zrakové funkce, hodnoty aberací vyšších řádů, hodnotu zbytkové refrakční vady a další údaje, které mají význam z hlediska eventuálního výskytu glaukomového onemocnění - jako nitrooční tlak a pachymetrii. Při všech kontrolních vyšetřeních jsme sledovali počet endoteliálních buněk. Charakteristiku jednotlivých skupin ukazuje tabulka 2. V závěru práce jsme jako přílohu přidali ukázky wavefront map pacientů z jednotlivých skupin před zákrokem a po něm.

Skupiny podle typu a způsobu operace:

- 1 – LASIK standardně
- 2 – LASIK ORK
- 3 – PRK standardně
- 4 – PRK ORK

Do první skupiny (LASIK) byla zařazeno 95 očí. Průměrný věk v souboru byl 30,29 (rozsah 22-47 let), průměrná sférická dioptrie byla $-4,76 \pm 2,24$ D (rozsah -8,5 až -1,5 D), průměrný cylindr $-0,31 \pm 0,51$ D, nekorigovaná zraková ostrost $0,11 \pm 0,17$ a korigovaná ZO $0,99 \pm 0,04$, hodnota aberací vyššího řádu (HO RMS) činila $0,553 \pm 0,214$ μm .

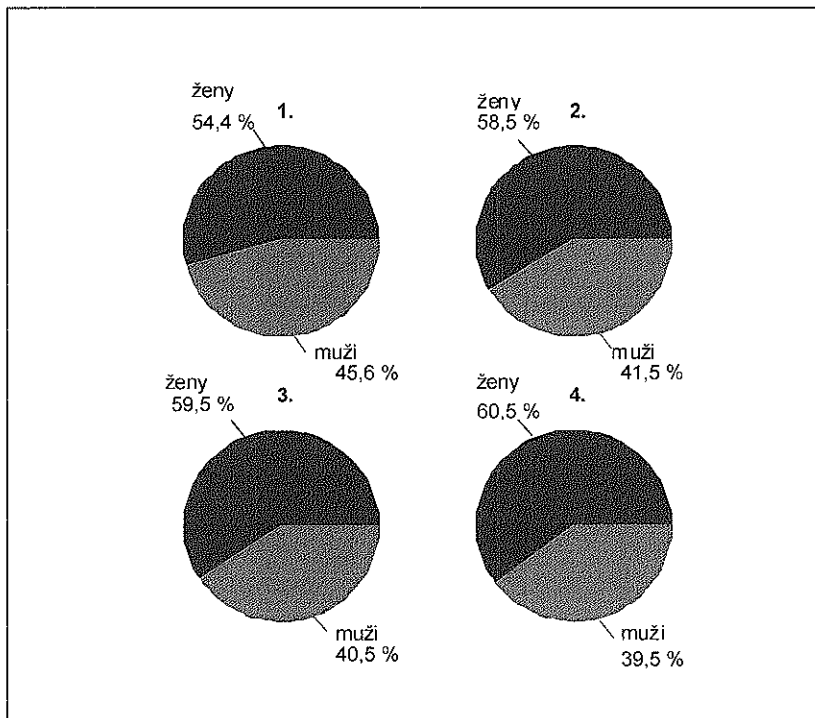
Druhou skupinu (LASIK ORK) tvořilo 37 očí. Průměrný věk ve skupině byl 31,25 roku (rozsah 23-43 let), NZO $0,12 \pm 0,19$, KZO byla $1,0 \pm 0$, průměrná sféra $-4,80 \pm 1,74$ D, průměrný cylindr $-0,57 \pm 0,75$ D a hodnota aberací vyššího řádu $0,506 \pm 0,099$ μm .

Třetí skupinu (PRK) tvořilo 40 očí. Průměrný věk v ní činil 31,65 let (rozsah 20-54 let), NZO byla $0,11 \pm 0,10$, KZO $1,0 \pm 0$, průměrná sférická dioptrie $-2,85 \pm 0,97$ D, průměrný cylindr $-0,23 \pm 0,38$ D, hodnota aberací vyššího řádu $0,545 \pm 0,226$ μm .

Čtvrtou skupinu (PRK ORK) tvořilo 41 očí. Průměrný věk v této skupině byl 28,71 rok (rozsah 19-47 let), NZO $0,17 \pm 0,16$, KZO $1,0 \pm 0$, průměrná sférická vada $-2,43 \pm 1,61$ D, průměrný cylindr $-0,54 \pm 0,62$ D a průměrná hodnota aberací vyššího řádu $0,546 \pm 0,131$ μm .

Tab. 2: Charakteristika jednotlivých skupin.

Skupina	1 LASIK	2 LASIK ORK	3 PRK	4 PRK ORK
Věk	30,29	31,25	31,65	28,71
Rozsah (roky)	22-47	23-43	20-54	19-47
Sf (D)	-4,76	-4,80	-2,85	-2,43
Cyl (D)	-0,31	-0,57	-0,23	-0,54
NZO	0,11	0,12	0,11	0,17
KZO	0,99	1,00	1,00	1,00
NT (mmHg)	14,6	15,4	16,2	14,8
Pachymetrie (μm)	553	549	557	553
Endotel (b/mm2)	2 879	2 947	2 874	2 878
HO-RMS (μm)	0,553	0,506	0,545	0,546



Obr. 3: Podíl mužů a žen v jednotlivých skupinách.

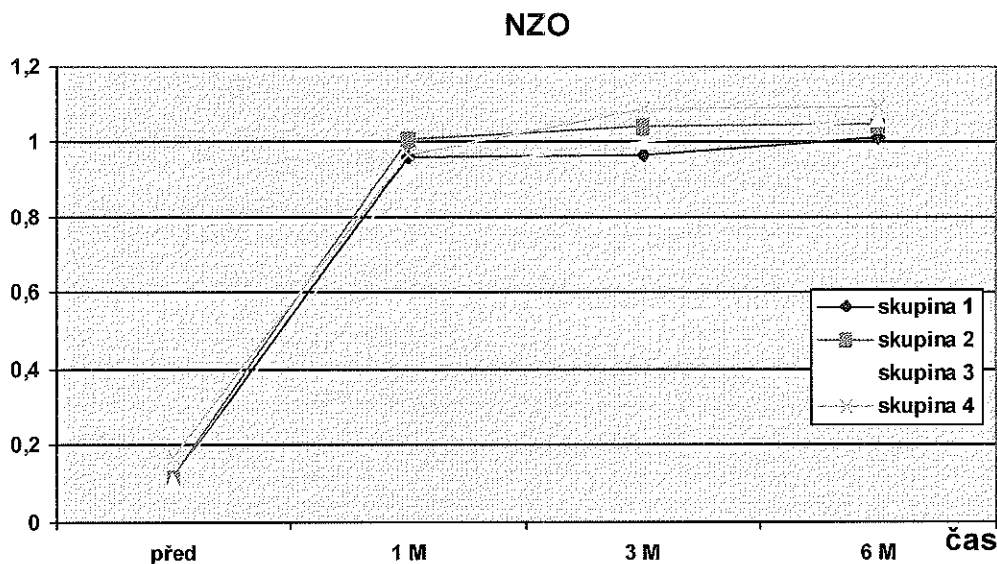
11. Výsledky

11.1 Nekorigovaná zraková ostrost (NZO)

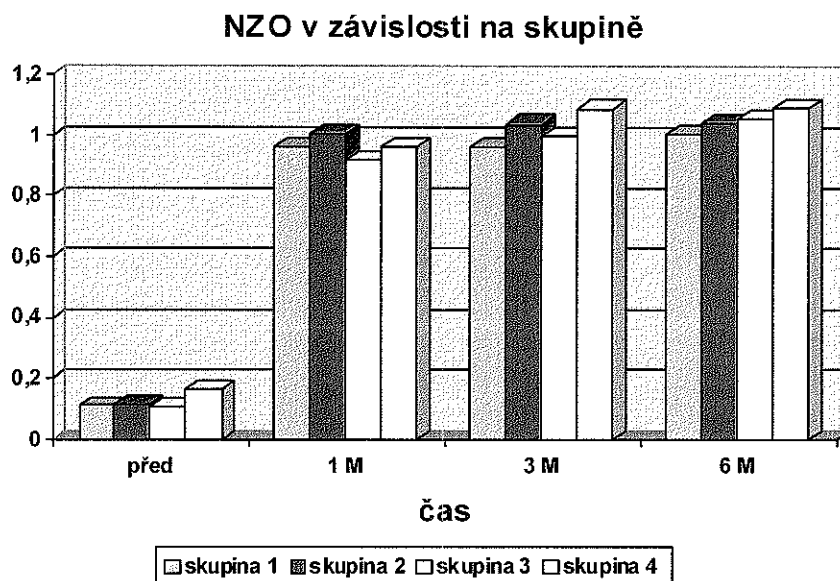
NZO byla před operací nízká ve všech skupinách. V pooperačním období se výrazně zlepšila již první měsíc po operaci a během všech kontrol zůstávala stabilní.

Průměrná hodnota NZO ve skupinách 1-4 byla 0,11 - 0,17.

Jeden měsíc po operaci byla NZO ve skupině 1 0,96, ve skupině 2 činila 1,01, ve skupině tři 0,92 a ve čtvrté skupině 0,96. Při kontrole za tři měsíce jsme zjistili NZO 0,97 v první skupině, 1,04 ve druhé skupině, 1,0 ve třetí skupině a 1,04 ve čtvrté skupině. Šest měsíců po operaci byly hodnoty NZO 1,01, resp. 1,05, 1,06, 1,1. Přesto, že jak po LASIKu tak po PRK byla zraková ostrost lepší ve skupině podle wavefront analýzy, nezjistili jsme statisticky významné rozdíly mezi skupinami 1-2 a 3-4 ani v jednom sledovaném období ($p > 0$). Vývoj a hodnoty nekorigované zrakové ostrosti ukazují obr. 4 a 5.



Obr. 4: Vývoj nekorigované zrakové ostrosti.

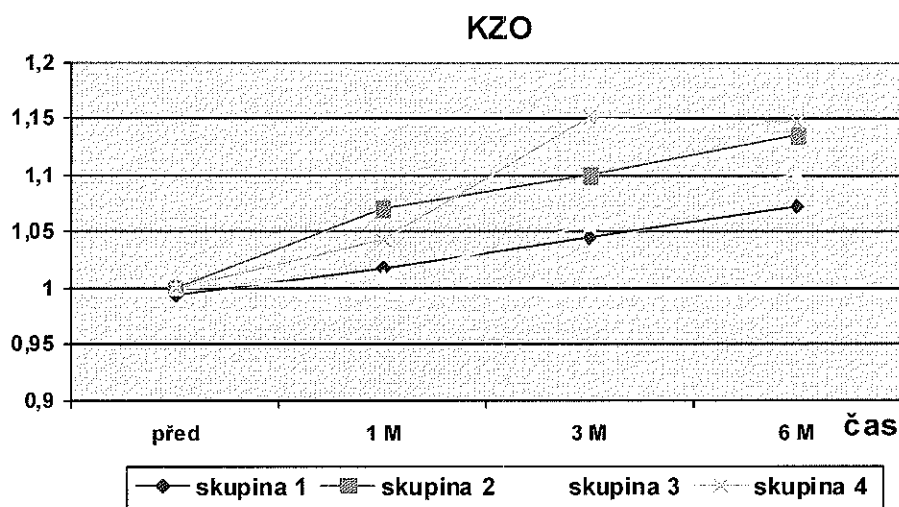


Obr. 5: Hodnoty nekorigované zrakové ostrosti.

11.2 Korigovaná zraková ostrost (KZO)

Nejlepší korigovaná zraková ostrost ve skupině 1 byla 0,99, v ostatní třech skupinách činila 1,0 v předoperačním období. Během následujících kontrol se ve všech skupinách postupně zlepšovala. Jeden měsíc po operaci byla KZO 1,02 ve skupině 1, ve skupině 2 činila 1,07, ve skupině 3 1,01 a ve čtvrté skupině 1,04. Tři měsíce po operaci byla KZO 1,05 ve skupině 1, resp. 1,10, 1,06 a 1,15. Šest měsíců po operaci byla KZO 1,07 v první skupině, resp. 1,14, a 1,10 a 1,15. Při statistickém zpracování jsme nezjistili statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými skupinami ani v předoperačním, ani v pooperačních obdobích.

Rozdíl mezi hodnotami sice není významný, ale z obr. 6 je patrné, že jak ve skupině LASIK, tak PRK jsou hodnoty KZO u ORK trochu vyšší než ve skupině standard. Tomu odpovídá i tzv. koeficient účinnosti (poměr pooperační a předoperační KZO), který je 6 měsíců po operaci u skupiny jedna 1,08, u skupiny dvě 1,14, u skupiny PRK standard 1,10 a u skupiny PRK ORK 1,15.



Obr. 6: Vývoj korigované zrakové ostrosti.

11.3 Refrakce

Ve studii jsme sledovali zvláště sférickou a zvláště cylindrickou komponentu refrakční vady.

V průběhu pooperačního období se zbytková sférická dioptrie pohybovala ve skupině LASIK od -0,02 do -0,16 D, ve skupině PRK od -0,03 do -0,09 D. Mezi skupinou standard a ORK jsme nezaznamenali statisticky významný rozdíl ani u LASIK, ani u PRK. Hodnoty refrakce po PRK ukazuje tab. 3 a po LASIKu tab. 4. Na obrázku 7 je patrný vývoj sférické vady v jednotlivých skupinách.

Hodnota cylindrické dioptrie byla před operací -0,31 D ve skupině LASIK standard, -0,57 D ve skupině LASIK ORK, -0,23 D u PRK standard a -0,54 D u PRK ORK. V pooperačním období se pohybovala od -0,09 do -0,13 D v první skupině, mezi -0,03 do -0,06 D ve druhé skupině, ve třetí skupině od -0,03 do -0,28 D a ve čtvrté skupině od -0,04 do -0,23 D. Při statistickém zhodnocení jsme nenašli statisticky významný rozdíl v hodnotách cylindru v jednotlivých sledovaných obdobích mezi skupinami standard a ORK jak u LASIKu, tak u PRK. Vývoj cylindru ukazuje obr. 8.

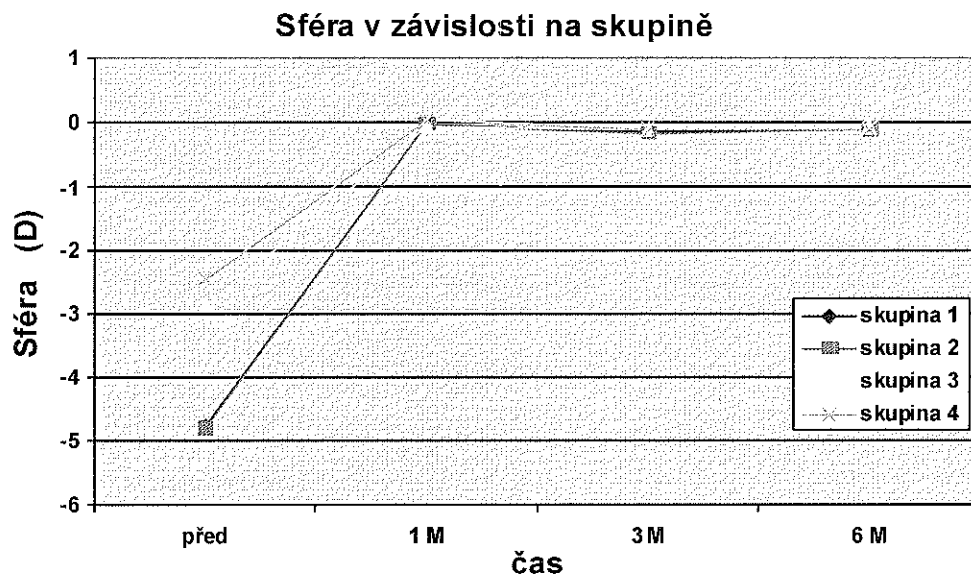
Zajímavé je sledovat osu cylindru. Zatímco před operací byla u LASIKu 158, resp. 142 stupňů, a u PRK 160, resp. 129 stupňů, v pooperačním období se osa cylindru pohybuje mezi 170 a 180 stupni ve všech skupinách.

Tab. 3: Hodnoty refrakce po LASIK.

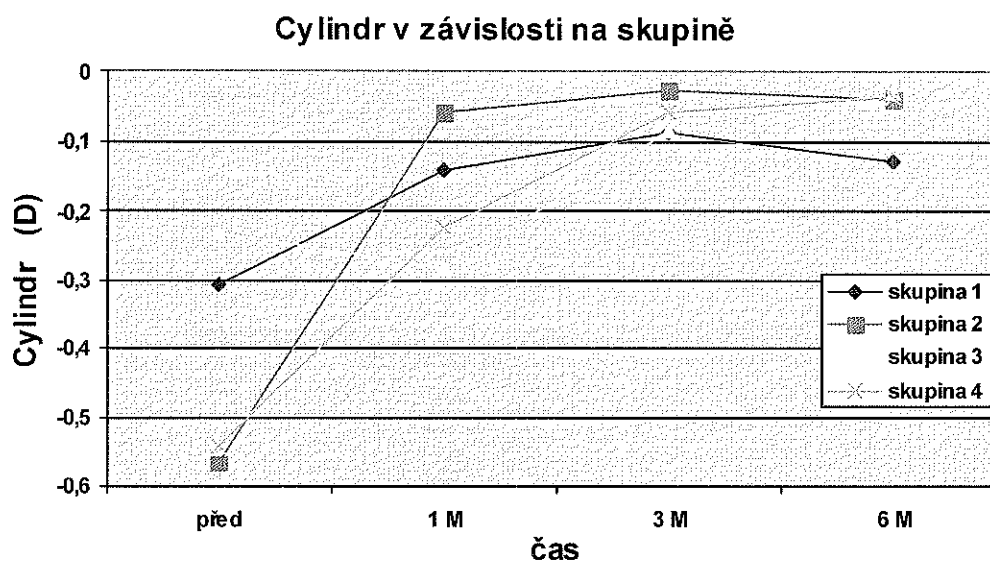
	Typ operace	před	1 M	3 M	6 M
Sf D	LASIK	-4,76	-0,04	-0,12	-0,11
	LASIK ORK	-4,80	-0,02	-0,16	-0,11
Cyl D	LASIK	-0,31	-0,11	-0,09	-0,13
	LASIK ORK	-0,57	-0,06	-0,03	-0,04
Osa	LASIK	158	174	170	170
	LASIK ORK	142	174	180	172

Tab. 4: Hodnoty refrakce po PRK.

	Typ operace	před	1 M	3 M	6 M
Sf D	PRK	-2,85	-0,05	-0,09	-0,07
	PRK ORK	-2,43	-0,03	-0,09	-0,09
Cyl D	PRK	-0,23	-0,28	-0,09	-0,03
	PRK ORK	-0,54	-0,23	-0,06	-0,04
Osa	PRK	160	171	166	179
	PRK ORK	129	170	179	176



Obr. 7: Vývoj sférické vady v čase v jednotlivých skupinách.



Obr. 8: Vývoj cylindrické vady.

11.4 Hodnoty aberací vyšších řádů

Ve všech souborech jsme sledovali celkovou hodnotu aberací vyšších řádů HO RMS a dále RMS jednotlivých aberací a RMS aberací jednotlivých řádů; všechny hodnoty jsou pro zornici o průměru 6 mm.

11.4.1 HO RMS

HO RMS představuje celkovou sumu aberací vyšších řádů, v našem případě to znamená všechny aberace 3. až 5. řádu.

Vývoj hodnot HO RMS v čase u jednotlivých skupin ukazuje obr. 9.

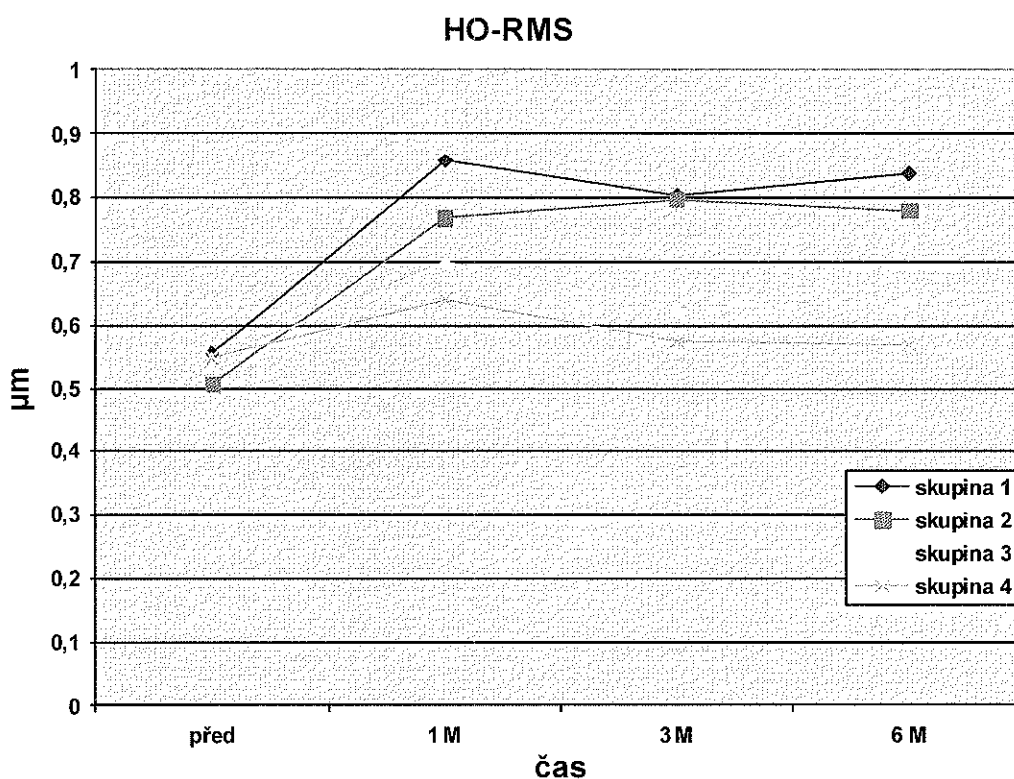
Ve skupině 1 (LASIK standard) došlo ke zvýšení hodnot HO RMS oproti předoperačním hodnotám. Předoperační hodnota byla $0,553 \pm 0,214 \mu\text{m}$, zatímco jeden měsíc po operaci se zvýšila na $0,858 \pm 0,340 \mu\text{m}$ a toto zvýšení přetrvávalo i při dalších kontrolách. Tři měsíce po operaci byla HO RMS $0,803 \pm 0,196 \mu\text{m}$ a po šesti měsících $0,840 \pm 0,331 \mu\text{m}$. Při statistickém zpracování jsme zjistili statisticky významný rozdíl mezi předoperačními a pooperačními hodnotami ve všech sledovaných obdobích.

Ve skupině 2 (LASIK ORK) byly výsledky podobné jako ve skupině 1. Oproti předoperačním hodnotám také došlo ke zvýšení HO RMS ve všech

sledovaných obdobích. Předoperační hodnoty byly $0,506 \pm 0,099 \mu\text{m}$, jeden měsíc po zákroku $0,763 \pm 0,372 \mu\text{m}$, tři měsíce $0,797 \pm 0,456 \mu\text{m}$ a šest měsíců $0,780 \pm 0,414 \mu\text{m}$.

Ve skupině 3 (PRK standard) jsme zaznamenali statisticky významný rozdíl v hodnotách HO RMS jak mezi předoperačními hodnotami, tak jeden měsíc po operaci, ale tři a šest měsíců po operaci došlo ke snížení HO RMS a toto snížení bylo statisticky významné ($p < 0,05$). Hodnoty HO RMS před operací byly $0,545 \pm 0,226 \mu\text{m}$, 1M $0,701 \pm 0,180 \mu\text{m}$, 3M $0,626 \pm 0,143 \mu\text{m}$ a 6M $0,642 \pm 0,142 \mu\text{m}$.

Ve skupině 4 (PRK ORK) jsme nezaznamenali statisticky významný rozdíl mezi pooperačními hodnotami HO RMS ve všech sledovaných obdobích ve srovnání s předoperačními hodnotami ($p > 0,05$). Předoperační hodnoty HO RMS byly $0,546 \pm 0,131 \mu\text{m}$, jeden měsíc po zákroku $0,640 \pm 0,291 \mu\text{m}$, tři měsíce $0,573 \pm 0,203 \mu\text{m}$ a šest měsíců $0,569 \pm 0,154 \mu\text{m}$.



Obr. 9: Vývoj hodnot HO RMS v čase.

Při vzájemném porovnání skupin 1 a 2 nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl v předoperačních hodnotách ($p > 0,05$). Při kontrolách za jeden, tři a šest měsíců byly hodnoty HO RMS ve skupině 2 nižší a tento rozdíl byl statisticky významný.

Při porovnání skupin 3 a 4 jsme nezaznamenali statisticky významný rozdíl v předoperačních hodnotách a tři měsíce po operaci. První a šestý měsíc byly hodnoty HO RMS ve skupině 4 nižší než ve skupině 3 a tento rozdíl byl statisticky významný. Viz tab. 5.

Tab. 5: Statistická významnost p rozdílu HO RMS mezi skupinami.

skupina	před	1 M	3 M	6 M
1, 2	0,499	0,001	0,017	0,03
3, 4	0,349	0,009	0,069	0,031

Zajímavé je sledování vývoje HO RMS v jednotlivých sledovaných obdobích v každé skupině. Ve skupinách 1 a 2 je statisticky významný rozdíl mezi předoperační hodnotou a hodnotami zjištěnými první, třetí a šestý měsíc po operaci.

Ve skupině 3 dochází ke zvýšení HO RMS první měsíc po operaci. Toto zvýšení je statisticky významné, ale následně ve třetím i šestém měsíci dochází k poklesu hodnot RMS, které je opět statisticky významné oproti hodnotám ve třetím měsíci. Rozdíl mezi předoperačními a pooperačními hodnotami však zůstává významný i třetí a šestý měsíc po zákroku. Statistickou významnost p rozdílu HO RMS ukazuje tab. 6.

Tab. 6: Statistická významnost p rozdílu HO RMS před operací a šest měsíců po operaci.

skupina	před (μm)	6 M (μm)	p
1 LASIK stand.	0,533	0,840	0,000
2 LASIK ORK	0,506	0,780	0,000
3 PRK stand.	0,545	0,642	0,000
4 PRK ORK	0,546	0,569	0,350

Ve skupině 4 jsme nezaznamenali statisticky významný rozdíl mezi předoperačními hodnotami a hodnotami v pooperačních obdobích.

Z uvedených sledování vyplývá, že metoda ORK indukuje méně HO RMS než metoda standard a tento rozdíl je významný jak ve skupině LASIK, tak ve skupině PRK. Zároveň lze říci, že hodnoty HO RMS jsou při laserové korekci nejméně ovlivněné metodou PRK ORK, která nevede k jejich zvýšení.

11.4.2 Komatické aberace

Koma se primárně vyskytuje ve třetím řádu s pozitivní a negativní frekvencí, sekundární komu nacházíme v pátém řádu. Komatická aberace je asymetrická vzhledem k fokusu, protože je přítomna relativní myopie i hypermetropie v jednom meridiánu, což způsobuje distorzi PSF (Point Spread Function) se zamlžením obrazu v jedné ose. Takové zobrazení je podobné kometě, od toho je odvozen i název této aberace [58]. Při hodnocení komy jsme provedli jednak hodnocení komy jako aberace 3. řádu RMS Z_3^{-1} a Z_3^1 , celkové komy (Z_3^{-1} , Z_3^1 , Z_5^{-1} a Z_5^1) a hodnocení aberací 3. řádu, které představují koma a trefoil. Pro posouzení hodnot primární komy se obvykle používá RMS Z_3^{-1} a Z_3^1 , tedy druhá odmocnina součtu kvadratických hodnot:

$$\text{RMS } (Z_3^{-1} + Z_3^1) = \sqrt{((Z_3^{-1})^2 + (Z_3^1)^2)}$$

Koma RMS ($Z_3^{-1} + Z_3^1$)

Při statistickém porovnání proměnných ve skupinách 1-2 a 3-4 Kruskalovým-Wallisovým testem jsme nezaznamenali významný rozdíl ani v předoperačních, ani v pooperačních hodnotách. I když je z tabulky patrné, že RMS hodnoty komy jsou vyšší ve skupině ORK, není tento rozdíl významný.

Hodnoty RMS komy se statistickou významností ukazuje tab. 7.

Tab. 7: Hodnoty RMS primární komy, tedy aberace 3. řádu.

Skupina	před (μm)	1 M (μm)	p (0-1M)	3 M (μm)	p (0-3M)	6 M (μm)	p (0-6M)
1 LASIK stand.	0,231	0,276	0,032	0,273	0,029	0,275	0,014
2 LASIK ORK	0,29	0,346	0,368	0,419	0,203	0,389	0,327
statist. významnost	p 0,053	p 0,520		p 0,218		p 0,202	
3 PRK stand.	0,273	0,347	0,046	0,317	0,159	0,327	0,091
4 PRK ORK	0,34	0,357	0,51	0,377	0,164	0,35	0,313
statist. významnost	p 0,151	p 0,935		p 0,080		p 0,448	

Při sledování vývoje hodnot v jednotlivých skupinách zjišťujeme, že ve skupině 1 je statisticky významný rozdíl mezi předoperační hodnotou a hodnotami při všech třech následujících kontrolách ($p < 0,05$).

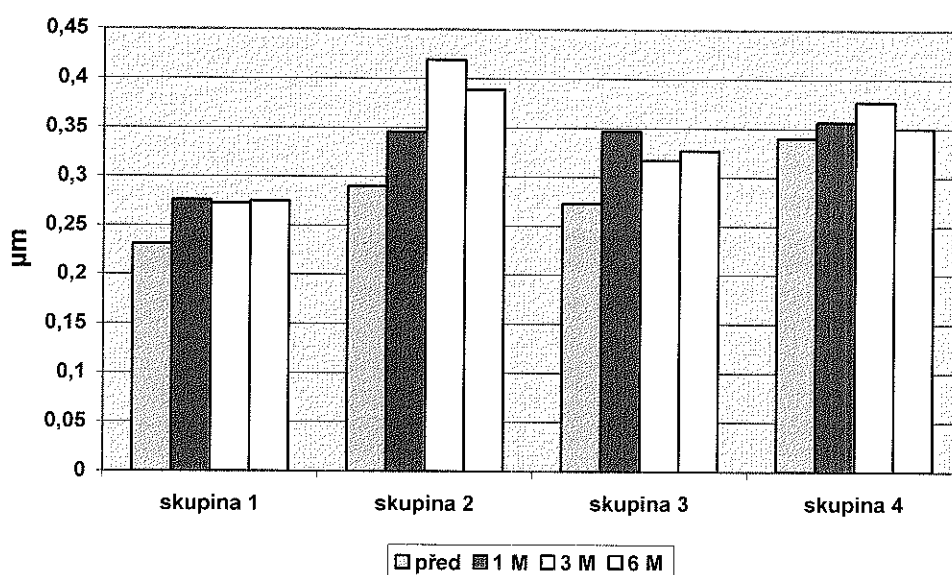
Ve skupině 2 nebyl významný rozdíl mezi hodnotami ($p > 0,05$).

Ve skupině 3 byl rozdíl mezi předoperační hodnotou a jeden měsíc po operaci ($p < 0,05$). Při dalších kontrolách jsme již rozdíl nezjistili.

Ve skupině 4 jsme opět nezaznamenali rozdíl mezi předoperačními a pooperačními hodnotami ($p > 0,05$).

Při sledování RMS hodnot primární komy jsme nezjistili statisticky významný rozdíl mezi skupinami standard a ORK ani u LASIKu, ani u PRK. Ve skupinách ORK nedošlo, na rozdíl od skupin standard, k významným změnám proti předoperačním hodnotám. Obr. 10 ukazuje vývoj komy v jednotlivých skupinách.

$$Z_3^{-1} + Z_3^1$$



Obr. 10: Rozložení hodnot komy v jednotlivých skupinách v čase.

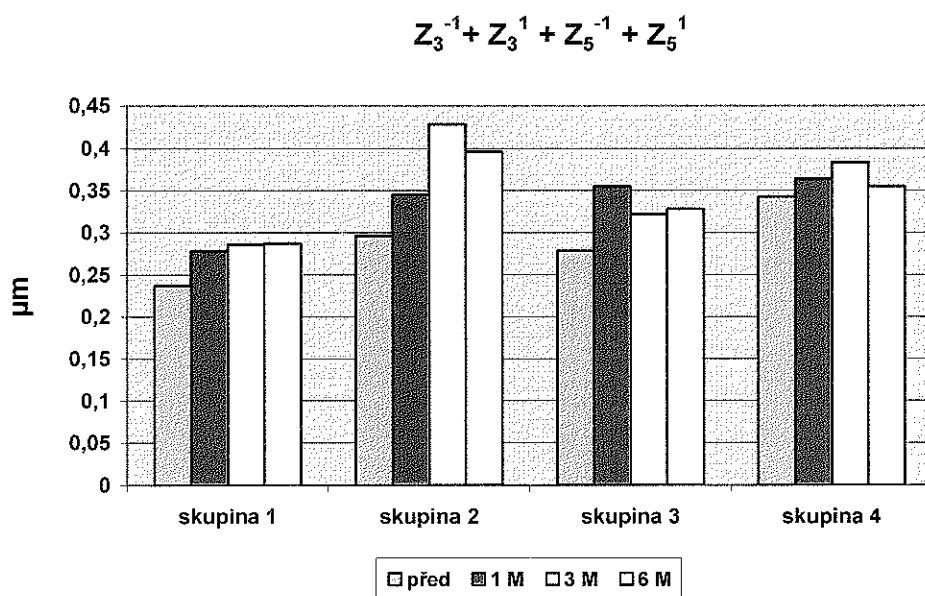
Celková koma RMS ($Z_3^{-1} + Z_3^1 + Z_5^{-1} + Z_5^1$)

Hodnoty celkové komy představují RMS primární a sekundární komy, tedy aberace třetího a pátého řádu. Pomocí dvojitého indexu lze celkovou komu vyjádřit jako $Z_3^{-1} + Z_3^1 + Z_5^{-1} + Z_5^1$. Zde jsme zaznamenali statisticky významný rozdíl v předoperačních hodnotách mezi skupinami 1 a 2. Všechna další porovnání mezi metodou standard a ORK se ukázala jako statisticky nevýznamná. Hodnoty celkové komy a statistickou významnost ukazuje tab. 8.

Tab. 8: RMS celkové komy.

Skupina	před (μm)	1 M (μm)	<i>p</i> (0-1M)	3 M (μm)	<i>p</i> (0-3M)	6 M (μm)	<i>p</i> (0-6M)
1 LASIK stand.	0,237	0,278	0,017	0,286	0,006	0,287	0,007
2 LASIK ORK	0,296	0,345	0,342	0,428	0,158	0,396	0,327
statist. významnost	<i>p</i> 0,046	<i>p</i> 0,533		<i>p</i> 0,236		<i>p</i> 0,234	
3 PRK stand.	0,278	0,355	0,037	0,322	0,145	0,328	0,062
4 PRK ORK	0,343	0,364	0,485	0,383	0,135	0,355	0,286
statist. významnost	<i>p</i> 0,171	<i>p</i> 0,846		<i>p</i> 0,467		<i>p</i> 0,467	

Při porovnávání proměnných v čase jsme zjistili statisticky významný rozdíl ve skupině 1 mezi předoperačními a všemi třemi pooperačními hodnotami ($p < 0,05$). Ve skupinách 2 a 4 jsme nezjistili statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$). Ve skupině 3 byl rozdíl v hodnotách před operací a 1 měsíc po operaci ($p 0,037$). Vývoj celkové komy v jednotlivých skupinách ukazuje obr. 11.



Obr. 11: Vývoj celkové komy v jednotlivých skupinách.

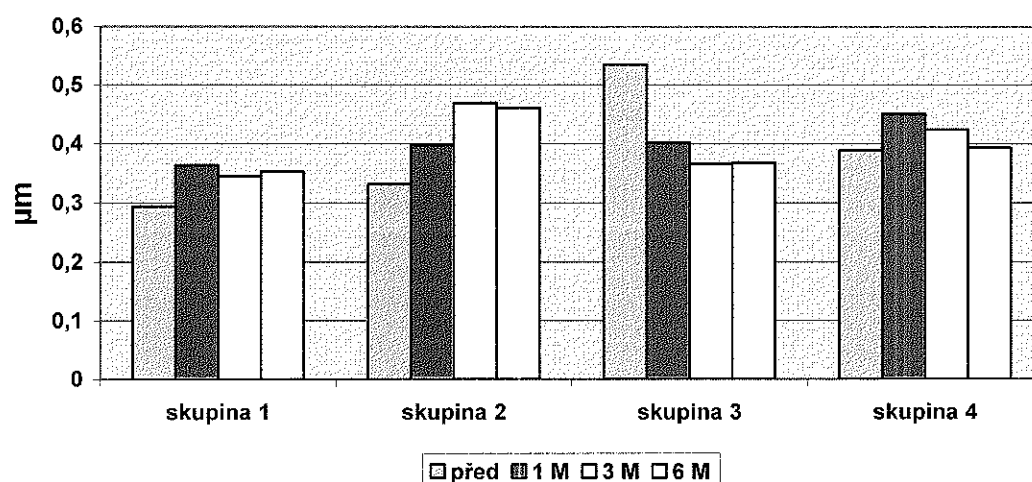
11.4.3 Aberace 3. řádu

$$RMS (Z_3^{-3} + Z_3^{-1} + Z_3^1 + Z_3^3)$$

Aberace třetího řádu představuje koma a trefoil, tedy $Z_3^{-3} + Z_3^{-1} + Z_3^1 + Z_3^3$. Při porovnání skupin standard a ORK jsme nezaznamenali statisticky významný rozdíl ani u LASIK ani u PRK.

Sledování proměnných v čase ukázalo ve skupině 1 rozdíl mezi předoperační hodnotou a 3 měsíce ($p 0,031$) a 6 měsíců po operaci ($p 0,009$). Ve skupinách 2, 3 a 4 nebyl významný rozdíl mezi hodnotami ($p > 0,05$).

$$Z_3^{-3} + Z_3^{-1} + Z_3^1 + Z_3^3$$



Obr. 12: Vývoj aberací 3. řádu v jednotlivých skupinách.

Z obrázku 12 je patrné, že u skupin 1, 2 a 4 dochází po zákroku k mírnému zvýšení aberací třetího řádu, avšak tento rozdíl není statisticky významný. Ve skupině PRK standard je patrná vyšší předoperační hodnota těchto aberací, ale není oproti PRK ORK statisticky významná. U metod PRK dochází postupně k poklesu hodnot aberací 3. řádu. Statisticky významný rozdíl byl pouze u skupiny jedna mezi předoperační hodnotou a tři a šest měsíců po operaci. Z výsledných hodnot se můžeme domnívat, že ani metoda zákroku, tedy LASIK nebo PRK ani způsob standard nebo ORK, nemají na tyto aberace vliv.

Tab. 9: Aberace 3. řádu.

Skupina	před (μm)	1 M (μm)	<i>p</i> (0-1M)	3 M (μm)	<i>p</i> (0-3M)	6 M (μm)	<i>p</i> (0-6M)
1 LASIK stand.	0,294	0,364	0,112	0,345	0,031	0,353	0,009
2 LASIK ORK	0,332	0,398	0,265	0,469	0,139	0,461	0,217
statist. významnost	<i>p</i> 0,101	<i>p</i> 0,652		<i>p</i> 0,333		<i>p</i> 0,384	
3 PRK stand.	0,535	0,402	0,054	0,366	0,394	0,368	0,13
4 PRK ORK	0,389	0,451	0,17	0,424	0,343	0,393	0,557
statist. významnost	<i>p</i> 0,133	<i>p</i> 0,432		<i>p</i> 0,110		<i>p</i> 0,625	

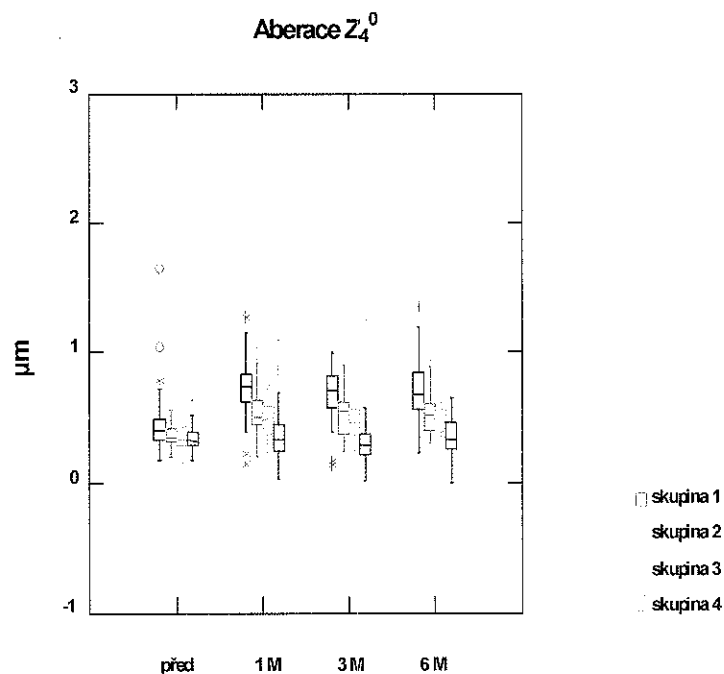
11.4.4 Sférická aberace

RMS Z₄⁰

U sférické aberace ve skupině LASIK jsme zaznamenali rozdíl hodnot mezi skupinami standard a PRK jak v předoperačním období, tak ve všech pooperačních obdobích ($p < 0,05$). Ve skupině PRK nebyl rozdíl v předoperačních hodnotách ($p > 0,05$), ale v pooperačních obdobích ($p < 0,05$). Ve skupině LASIK i ve skupině PRK byly při použití metody ORK statisticky významně nižší hodnoty sférické aberace. Ve skupině PRK ORK dokonce nedošlo k žádné indukci sférické aberace, což je očekávaný a logický výsledek, poněvadž metoda standard je sférický profil, jak bylo dříve uvedeno, a tudíž ze své podstaty musí indukovat sférickou aberaci, a to pozitivní v případě korekce myopie a negativní v případě hypermetropie. Absolutní hodnota indukované sférické aberace bude tím větší, čím větší dioptrická vada se koriguje. Viz tab. 10.

Tab. 10: Hodnoty sférické aberace Z_4^0 .

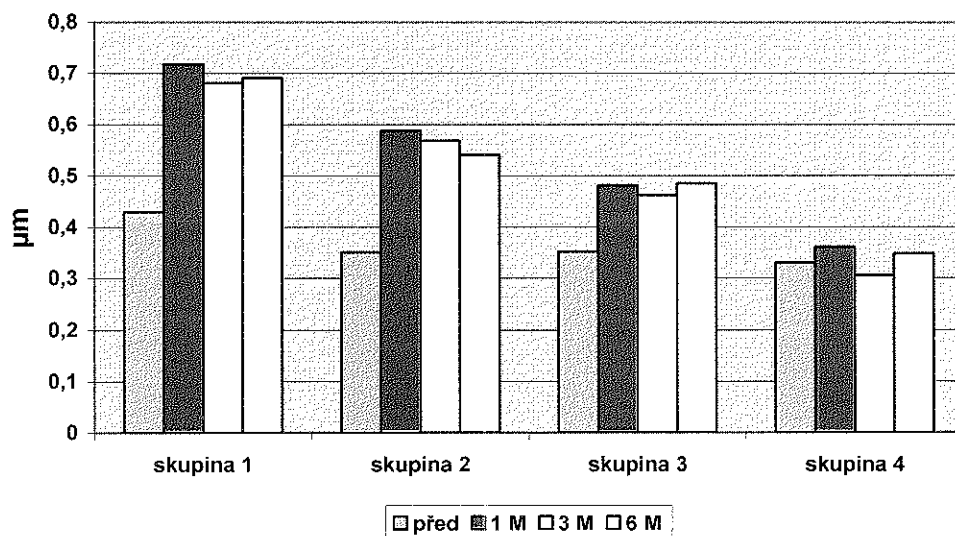
Skupina	před (μm)	1 M (μm)	p (0-1M)	3 M (μm)	p (0-3M)	6 M (μm)	p (0-6M)
1 LASIK stand.	0,43	0,718	0,000	0,681	0,000	0,691	0,000
2 LASIK ORK	0,351	0,587	0,000	0,568	0,000	0,541	0,000
statist. významnost	p 0,017	p 0,000		p 0,000		p 0,000	
3 PRK stand.	0,352	0,481	0,000	0,462	0,000	0,485	0,000
4 PRK ORK	0,33	0,361	0,757	0,305	0,074	0,348	0,658
statist. významnost	p 0,360	p 0,001		p 0,000		p 0,000	



Obr. 13: Rozložení jednotlivých hodnot Z_4^0 .

Na obr. 13 je krabicový graf, který ukazuje rozložení jednotlivých hodnot Z_4^0 . Obdélník uzavírá 50 % dat, čára napříč obdélníkem označuje medián. Úsečky vně obdélníku znázorňují rozptyl dat a jednotlivé body mimo jsou tzv. odlehlé hodnoty. Větší rozptyl dat a dvě odlehlé hodnoty ve skupině 1 v předoperačním období mohly způsobit významný rozdíl mezi skupinami 1 a 2. Zejména právě v předoperačním období je dobře patrné, že zatímco ve skupině 1 je poměrně velký rozptyl mezi hodnotami, v ostatních skupinách, zejména ve skupině 2 je rozptyl hodnot minimální.

$$Z_4^0$$



Obr. 14: Vývoj sférické aberace v jednotlivých skupinách.

Na obr. 14 je dobře vidět, že ve skupinách 1 až 3 dochází k významnému zvýšení hodnot sférické aberace první měsíc po operaci. V dalších obdobích sice hodnoty mírně klesají, ale nedojde k jejich návratu na hodnoty výchozí. Zároveň je patrné, že zvýšení sférické aberace je u metody ORK menší než u metody standard. Ve skupině 4 nedochází ke zvýšení hodnot sférické aberace oproti předoperačním hodnotám ($p > 0,05$). Z obrázku je zároveň dobře patrné, že při přibližně stejných předoperačních hodnotách dochází k největšímu zvýšení sférické aberace ve skupině LASIK standard, menší je u LASIK ORK, ještě menší u PRK standard a u PRK ORK ke zvýšení prakticky nedochází.

11.4.5 Aberace 4. řádu

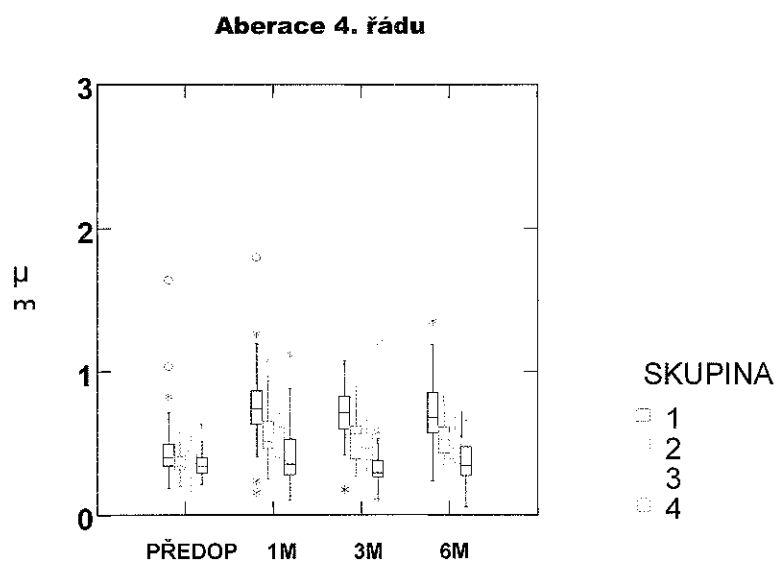
$$RMS (Z_4^{-4} + Z_4^{-2} + Z_4^0 + Z_4^2 + Z_4^4)$$

Mezi aberace 4. řádu patří sférická aberace, sekundární astigmatismus a tetrafoil. Hlavní význam má v této skupině sférická aberace s nulovou frekvencí. Proto jsme zřejmě zjistili stejnou významnost mezi skupinami jako při hodnocení samostatné sférické aberace.

V předoperačních hodnotách byl statisticky významný rozdíl mezi skupinami 1 a 2, viz tab. 11, mezi skupinami 3 a 4 nebyl statisticky významný rozdíl.

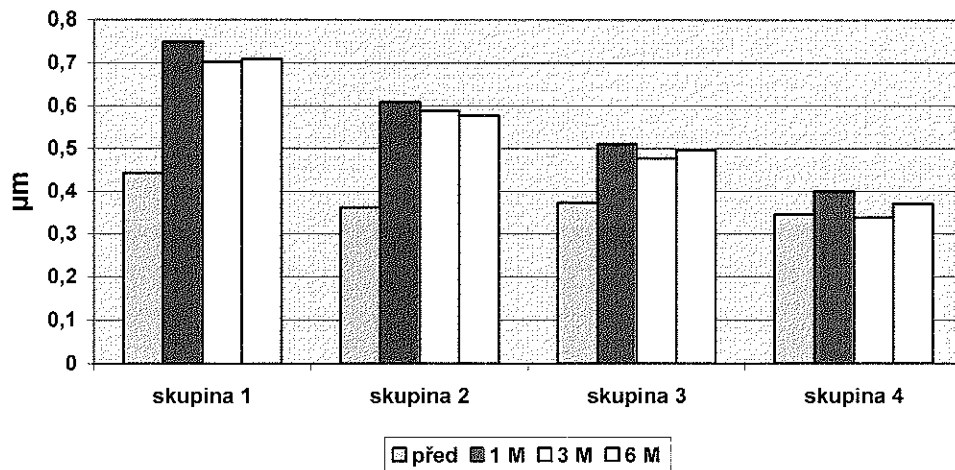
Tab. 11: Aberace 4. řádu.

Skupina	před (μm)	1 M (μm)	p (0-1M)	3 M (μm)	p (0-3M)	6 M (μm)	p (0-6M)
1 LASIK stand.	0,443	0,749	0,000	0,702	0,000	0,709	0,000
2 LASIK ORK	0,362	0,609	0,000	0,588	0,000	0,577	0,000
statist. významnost	p 0,017	p 0,000		p 0,000		p 0,000	
3 PRK stand.	0,373	0,51	0,000	0,477	0,000	0,496	0,000
4 PRK ORK	0,346	0,4	0,242	0,338	0,228	0,371	0,557
statist. významnost	p 0,294	p 0,001		p 0,000		p 0,000	



Obr. 15: Rozptyl hodnot aberací 4. řádu.

$$Z_4^{-4} + Z_4^{-2} + Z_4^0 + Z_4^2 + Z_4^4$$



Obr. 16: Vývoj aberací 4. řádu.

Stejně tak při zobrazení rozptylu mezi skupinami 1 a 2 v předoperačním období vidíme mnohem větší rozptyl ve skupině 1, jak je vidět na obr. 15. Podobně jako u sférické aberace je statisticky významný rozdíl mezi metodami standard a ORK jak u LASIK, tak u PRK ($p < 0,05$) ve všech sledovaných obdobích, viz obr. 16.

Vývoj aberací čtvrtého řádu je stejný ve skupinách 1 až 3, dochází k významnému zvýšení pooperačních hodnot. Pouze u skupiny PRK ORK ke zvýšení hodnot nedochází.

11.4.6 Aberace 5. řádu

$$RMS (Z_5^{-5} + Z_5^{-3} + Z_5^{-1} + Z_5^1 + Z_5^3 + Z_5^5)$$

Aberace 5. řádu představuje sekundární koma, sekundární trefoil a pentafoil. Při statistickém zhodnocení jsme nezjistili rozdíl mezi metodou standard a ORK ani u skupin LASIK, ani u PRK. Zdá se, že tyto aberace nejsou ovlivněny typem zákroku.

Tab. 12: Hodnoty aberací 5. řádu se statistickou významností.

Skupina	před (μm)	1 M (μm)	<i>p</i> (0-1M)	3 M (μm)	<i>p</i> (0-3M)	6 M (μm)	<i>p</i> (0-6M)
1 LASIK stand.	0,07	0,106	<i>0,001</i>	0,105	<i>0,000</i>	0,101	<i>0,000</i>
2 LASIK ORK	0,071	0,09	<i>0,041</i>	0,088	<i>0,007</i>	0,094	<i>0,003</i>
statist. významnost	<i>p 0,737</i>	<i>p 0,457</i>		<i>p 0,079</i>		<i>p 0,070</i>	
3 PRK stand.	0,083	0,108	<i>0,006</i>	0,08	<i>0,120</i>	0,07	<i>0,856</i>
4 PRK ORK	0,061	0,096	<i>0,001</i>	0,08	<i>0,000</i>	0,074	<i>0,043</i>
statist. významnost	<i>p 0,519</i>	<i>p 0,066</i>		<i>p 0,895</i>		<i>p 0,236</i>	

Při sledování vývoje aberací v jednotlivých skupinách lze vidět, že ve skupinách 1, 2 a 4 je statisticky významné zvýšení hodnot oproti hodnotám před operací. Ve skupině 3 tento rozdíl nebyl.

12. Diskuse

Každým rokem se v celém světě zvyšuje počet refrakčních operací. Zkušenosti a užívání propracovanějších metod vedou ke zvýšení bezpečnosti a účinnosti laserových refrakčních operací. Stabilitu výkonu dokazují četné dlouhodobé studie [43, 78, 88]. Tyto zákroky však často vedly ke zvýšení hodnot očních aberací, které degradují retinální obraz a zhoršují zrakový výkon [3, 18]. Výsledkem pak bylo zhoršení korigované zrakové ostrosti a subjektivní stesky pacienta, který udával nepříjemné světelné jevy jako halo, glare apod. V minulosti byl obvykle používán standardní ablační profil založený na Munnerlynově vzorci, který vychází ze sférického modelu. Důsledkem je indukovaný rozdíl oproti fyziologickému asférickému tvaru rohovky. Ta má tvar protáhlého elipsoidu, tj. v periférii má větší lámavost než v centru. Tedy ablace založená na Munnerlynově vzorci musí ze své podstaty generovat především sférickou aberaci, a to pozitivní, jedná-li se o korekci myopie, a negativní, jde-li o korekci hypermetropie. Tento výsledek předložená práce plně potvrzuje. Uvedená skutečnost, společně s biomechanickou odpovědí rohovkové tkáně a hojivým procesem včetně remodelace stromatu a hyperplazie epitelu, je považována za odpovědnou za indukci aberací vyšších řádů po laserových operacích [86].

Technologické novinky v laserové refrakční chirurgii v posledních několika letech umožnily zavedení přístrojů, jež mohou tyto aberace oka změřit, do klinické praxe. Wavefront analýza kvantifikuje rozdíl mezi ideální (pouze difrakcí omezenou) vlnoplochou dopadající na sítnici opticky naprosto dokonalého oka a reálnou deformovanou vlnoplochou dopadající na sítnici určitého konkrétního vyšetřovaného pacienta. Matematicky je možno pro popis takovéto deformace použít mnoha instrumentů. V praxi se nejčastěji setkáváme s tím, že deformaci vlnoplochy vyjadřujeme jako součet jednotlivých Zernikeových polynomů. Systém Zernikeových polynomů zahrnuje jak aberace nižších řádů (defokus a astigmatismus), tak aberace vyšších řádů (koma, trefoil, quadrafoil) a zároveň poskytuje podklad pro individualizovanou ablaci rohovky. Korekce většiny monochromatických očních aberací do 5. řádu Zernikeova pořadí adaptivní optikou umožní zobrazení jednotlivých fotoreceptorů. To zpětně dává předpoklad, že

odstranění aberací do pátého řádu je dostatečné pro dosažení neuronové ostrosti, která je dána rozmístěním fotoreceptorů [28].

V současné době lze optické aberace měřit pomocí sofistikovaných přístrojů, které jsou založeny na různých metodách např. Tscherningův senzor, Shackův-Hartmannův senzor, sledování chodu jednotlivých světelných paprsků, OPD aberometr (Optical Path Difference Aberrometry) nebo refraktometr s prostorovým rozlišením. Vzájemné porovnání výsledků z různých typů přístrojů je přesto poněkud sporné.

V první řadě je velmi důležité znát, co můžeme považovat za normální hodnoty u normální populace, a vědět, jak tyto informace korelují s klinickou refrakcí. Existují práce, které analyzovaly wavefront aberace buď v běžné populaci, nebo u pacientů před refrakční operací [26, 32, 64, 80, 98, 99, 100]. Další práce hodnotí aberace po refrakčních operacích [11, 12, 33, 34, 38, 67, 68, 97]. Problém však nastává při hodnocení a vzájemném porovnávání těchto aberací, neboť použitá metodika není jednotná, přičemž hraje zásadní roli pro správnou interpretaci zjištěných výsledků. Je to např. velikost zornice, sledování rohovkových či celkových aberací, u rohovkových aberací hodnocení pouze přední plochy rohovky nebo přední i zadní plochy či jednotky aberací. Dalším sledovaným faktorem je opakovatelnost vyšetření a srovnatelnost hodnot z různých typů wavefront analyzátorů. Již dříve někteří autoři připustili, že aby srovnání různých wavefront zařízení bylo spolehlivé, musí být použity určité standardy. Přesto, že v současné době jsou tyto standardy stanoveny, řada zařízení používá výstupní formát, který není ve shodě s doporučeními [96]. Burakgazi a kol. srovnávali optické aberace měřené na třech aberometrech - Zywave aberometr, který je založen na Hartmanově-Shackově principu, CustomVue wavefront analyzátor, také založen na Hartmanově-Shackově principu a OPD Scan. Studie u jednotlivých přístrojů prokázala nízkou chybu opakování (repeatability error). Při srovnání jednotlivých aberometrů mezi sebou byl statisticky významný rozdíl v několika parametrech aberací vyšších řádů, nicméně tyto rozdíly neměly klinický význam [12]. Kezirian a kol. ve své práci upozorňují nejen na nutnost zavedení standardů do měření, výpočtů a hodnocení wavefront analyzátorů, ale i na zavedení výrobních standardů pro wavefront aberometry a laserové přístroje umožňující ablaci podle wavefront analýzy. Cílem je

nejen možnost vzájemného srovnání, ale i lepší porozumění této problematice cílovou skupinou, což jsou lékaři a zejména chirurgové.

Cílem refrakčních operací podle wavefront analýzy je nové aberace při korekci sféry a astigmatismu neindukovat, respektive korigovat aberace vyšších řádů u pacientů, kterým přítomnost HOA snižuje kvalitu vidění. Snaha zcela odstranit existující aberace pro celé spektrum vlnových délek světla a všechny průměry zornice je nereálná a těžko dosažitelná a navíc zřejmě ne zcela žádoucí. Levy hodnotil aberace vyšších řádů u osob se „supernormálním“ viděním, kteří měli NZO 1,6 a lepší. Zjistil, že množství celkových aberací vyšších řádů nebylo zanedbatelné, naopak bylo srovnatelné s hodnotami HOA zjištěnými u myopických pacientů před refrakční operací [49]. Spíš se nabízí otázka, zda různé kombinace aberací povedou ke zlepšení nebo ke zhoršení vidění. Je známo, že v celkové sumě je rozložení jednotlivých aberací oka různé, takže dva pacienti se stejnou hodnotou HO RMS mohou mít rozdílné vidění [5, 6]. Zde opět narážíme na otázku, jaká hodnota je ještě fyziologická a jaká nikoliv. Jistě v tom bude hrát roli subjektivní vnímavost, fyziologicky dané limity zrakového výkonu a individualita mozkového zpracování vizuálního vjemu. V současné době jsou zdůrazňovány hlavně aberace, které nejpravděpodobněji alterují zrakové funkce. Jsou to defokus, cylindr, sférická aberace a koma. Tedy aberace, které nejvíce alterují zrakovou ostrost, protože jejich „váha“ je u normální populace vyšší než u ostatních aberací. Funkční dopad ostatních aberací - jako je trefoil, quatrefoil - není zcela jasný a bude nutné další studium těchto aberací. Stejně tak není jasný význam interakcí mezi jednotlivými Zernikeovými mody [1].

V předložené práci jsme kromě základních zrakových funkcí - jako nekorigovaná zraková ostrost a nejlepší korigovaná zraková ostrost - hodnotili RMS aberací do 5. řádu (HO RMS), dále komu jako aberaci třetího řádu, celkovou komu, sférickou aberaci, RMS aberací třetího řádu, RMS aberací čtvrtého a pátého řádu. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem nesrovnáváme jednotlivé veličiny s ostatními autory, ale zaměřujeme se na srovnání skupin standard a ORK a sledování pooperačního vývoje aberací.

V našem souboru jsme prokázali vysokou účinnost laserových operací u metody standard i ORK v obou skupinách - LASIK i PRK. Nekorigovaná zraková ostrost byla jeden měsíc po operaci 0,96 ve skupině jedna a čtyři, ve skupině dvě byla 1,01 a ve skupině 3 činila 0,92. Nejlepší korigovaná zraková ostrost byla první měsíc po operaci 1,0 a lepší. „Koeficient účinnosti“ (the efficacy index) šest měsíců po operaci byl ve skupině LASIK standard 1,08, ve skupině LASIK ORK 1,14, u PRK standard 1,10 a PRK ORK 1,15. Přesto, že jak po LASIKu, tak po PRK byla zraková ostrost nekorigovaná i korigovaná lepší ve skupině podle wavefront analýzy, nezjistili jsme statistické rozdíly mezi skupinami 1-2 a 3-4 v žádném ze sledovaných období. Nuits a kol. hodnotili výsledky 12 pacientů se střední myopií, kteří podstoupili oboustranný LASIK, avšak na jednom oku byla provedena planoscan-ablace a na druhém ablaci podle wavefront analýzy. Šest měsíců po zákroku byl koeficient účinnosti 1,12 resp. 1,08. Autor zároveň hodnotil subjektivní spokojenost pacientů a uvedl, že 42 % pacientů bylo více spokojeno s okem operovaným podle wavefront analýzy a 33 % preferovalo oko se standardní ablací, 25 % pacientů nedávalo přednost žádnému oku [67]. Korekce aberací vyšších řádů přináší klientovi jednoznačný prospěch [18, 101]. Hlavním cílem operací provedených podle wavefront analýzy je redukce zvýšení HOA, namísto jejich plné korekce.

V našem souboru jsme prokázali, že metoda ORK významně snižuje indukci aberací vyšších řádů HO RMS, ve skupině PRK ORK jsme dokonce nezjistili rozdíl mezi předoperačními a pooperačními hodnotami. Studie zkoumající hodnoty vyšších řádů u jednotlivců s nadprůměrným viděním ukazují, že i oči s vizem 1,5 a lepším mají určité množství aberací vyšších řádů. Toto množství aberací dokonce není statisticky odlišné od množství aberací přítomných v „normálně“ vidoucím oku. V našem souboru se předoperační rohovkové hodnoty HO RMS pohybovaly v rozmezí 0,506 až 0,546 μm , po zákroku došlo k největšímu zvýšení ve skupině LASIK standard o 0,305 μm jeden měsíc po zákroku, ve skupině LASIK ORK byl největší rozdíl tři měsíce po operaci a činil 0,291 μm , ve skupině PRK standard byl první měsíc po zákroku rozdíl 0,156 μm a u PRK ORK byl první měsíc po zákroku rozdíl 0,097 μm . V této skupině nebyl statisticky významný rozdíl mezi předoperačními a pooperačními hodnotami. Podobné výsledky by se daly očekávat

i ve skupině LASIK ORK, ale zde došlo ke statisticky významnému zvýšení v pooperačních obdobích. To může souviset jednak s vlastním řezem lamely, jednak s tím, že oproti PRK byly vyšší hodnoty výchozí refrakční vady. Při vzájemném porovnání LASIK standard a ORK je indukce HOA ve skupině ORK významně menší. Rozdílné výsledky prezentuje ve své práci Chung a kol., kteří srovnávali celkové HO RMS u ablace podle wavefront analýzy u LASIKu a LASEKu a zjistili menší indukci aberací vyšších řádů a sférické aberace u metody LASIK. Naznačují, že vliv tvorby lamely u LASIKu na HOA může být menší než indukce HOA vlastní operací [34]. Ve své práci jsme skupiny LASIK a PRK neporovnávali z důvodu odlišných vstupních dat.

Zhou se spoluautory hodnotili rohovkové aberace vyšších řádů měřené na stejném keratopografu Keratron Scout, jaký používáme na našem pracovišti. Soubor obsahoval 56 očí 28 pacientů. Hodnotili RMS aberací třetího, čtvrtého, pátého a šestého řádu, sférické aberace, komatické aberace a celkové HO RMS. Uvádějí statisticky významné zvýšení ve všech těchto skupinách jeden rok po operaci [105]. V našem souboru jsme po zákroku zjistili, že aberace třetího řádu se oproti předoperačním hodnotám významně zvýšily ve skupině LASIK standard tři a šest měsíců po zákroku, v ostatních skupinách nebyl významný rozdíl. Aberace čtvrtého řádu se ve skupinách 1 až 3 významně zvýšily ve všech obdobích, u skupiny PRK ORK nedošlo ke zvýšení oproti předoperačním hodnotám. Aberace pátého řádu se zvýšily ve sledovaných obdobích u skupin 1, 2 a 4, u skupiny PRK standard nedošlo ke zvýšení v žádném období. Koma se ve skupině LASIK standard zvýšila při všech kontrolách, u PRK standard došlo ke zvýšení pouze měsíc po operaci, u skupin LASIK ORK a PRK ORK nenastalo zvýšení. Sférická aberace vzrostla u skupin 1 až 3, u PRK ORK nedošlo ke zvýšení. Stejný výsledek byl u celkových aberací HO RMS - u skupiny PRK ORK se hodnoty na rozdíl od ostatních skupin nezvýšily.

Podobné výsledky prezentují Kohnen a kol. Sledovali celkové aberace při 3,5 a 6mm zornici. Pro 6mm zornici zjistili jeden rok po operaci statisticky významné zvýšení HO RMS, aberací čtvrtého řádu a sférické aberace. Aberace třetího řádu se nezvýšily [38].

Některé studie prokázaly, že indukce aberací vyšších řádů po LASIKu je v korelaci se signifikantně zhoršeným viděním [68, 100]. Chung a kol. sledovali hodnoty aberací vyšších řádů po LASIKu a po LASEKu a zjistili menší celkové množství aberací vyšších řádů po LASIKu než po LASEKu. U části pacientů růst některých aberací vyšších řádů způsobuje zrakové fenomény jako halo, glare, monokulární diplopii, zhoršení KZO a snížení citlivosti na kontrast [33, 49]. Melamud uvádí tři nemocné s monokulární diplopií, u nichž byly zjištěny zvýšené hodnoty komatické aberace. V jednom případě šlo o pacienta po laserové operaci, u dvou dalších pacientů nebyla předchozí laserová operace. Naznačuje, že v těchto případech by refrakční operace zaměřená na korekci komatické aberace mohla být potenciální léčbou monokulární diplopie [58].

V našem souboru jsme jednoznačně prokázali, že zákroky provedené podle wavefront analýzy snižují indukci aberací vyšších řádů po laserových operacích. Obzvláště ve skupině PRK ORK na rozdíl od ostatních skupin nedošlo v šestiměsíčním sledovaném období po zákroku ke zvýšení hodnot celkových aberací HO RMS, komy, sférické aberace, aberací třetího řádu ani aberací čtvrtého řádu. Pouze u aberací pátého řádu se projevilo zvýšení hodnot. I u metody LASIK jsme zjistili statisticky významný rozdíl v množství indukovaných aberací vyšších řádů mezi metodou standard a ORK.

Laserové zákroky jsou dnes považovány za standardní chirurgickou metodu k odstranění dioptrické vady. Spojení laserů s wavefront analýzou umožňuje nejen dosažení skvělých refrakčních výsledků, ale i zvýšení subjektivní spokojenosti pacientů.

13. Odpovědi na cíl práce

1. Průměrná nekorigovaná zraková ostrost šest měsíců po operaci byla ve všech čtyřech skupinách 1,0 a vyšší a nebyl statisticky významný rozdíl mezi skupinami standard a ORK u LASIK ani PRK. Průměrná nejlepší korigovaná ZO byla již první měsíc po zákroku lepší než před operací ve všech skupinách, při dalších kontrolách se dále zlepšovala. Nejistili jsme statisticky významný rozdíl mezi metodami standard a ORK ve skupinách LASIK ani PRK. Hodnoty ve skupinách ORK byly vyšší, ale tento rozdíl nebyl statisticky významný.
2. Hodnoty HO RMS byly statisticky významně nižší u metody ORK oproti metodě standard u LASIK i PRK. Ve skupině PRK ORK - na rozdíl od ostatních skupin - dokonce nenastalo zvýšení hodnot v pooperačním období.
3. Při sledování RMS hodnot komatických aberací nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi skupinami standard a ORK ani u LASIK, ani u PRK. Ve skupinách ORK nebyly na rozdíl od skupin standard významné změny oproti předoperačním hodnotám u primární komy. Hodnoty celkové komy se významně zvýšily u skupiny LASIK standard, u PRK standard vzrostly 1 M po zákroku. Ve skupinách ORK nedošlo k jejich zvýšení. Koma společně se sférickou aberací jsou považovány za aberace, které se nejvíce podílejí na alteraci pooperačního vizu a jsou příčinou vzniku nežádoucích zrakových fenoménů jako glare, halo, monokulární diplopie a dalších.
4. Rozdíl hodnot aberací třetího řádu mezi metodami standard a ORK není statisticky významný ani u skupiny LASIK, ani u PRK. U skupin ORK nedošlo v pooperačním období k indukci těchto aberací.
5. Hodnoty sférické aberace byly po operaci významně nižší u skupin ORK než u skupin standard. Ve skupině PRK ORK jsme - na rozdíl od ostatních skupin - nezaznamenali žádnou indukci sférické aberace. Na hodnoty sférické aberace má jednoznačně vliv typ zákroku - LASIK nebo PRK - i metoda - standard nebo ORK.
6. Stejně jako u sférické aberace i aberace čtvrtého řádu byly opět významně nižší u skupin ORK, u PRK ORK nedošlo ke zvýšení hodnot po zákroku.

7. U aberací 5. řádu jsme nezjistili rozdíl mezi skupinami standard a ORK a u skupin 1, 2 a 4 bylo statisticky významné zvýšení proti předoperačním hodnotám.
8. Provedení zákroku podle wavefront analýzy jednoznačně vede ke snížení rizika indukce aberací vyšších řádů. Statisticky významný rozdíl mezi metodami standard a ORK byl u hodnot HO RMS, sférické aberace a aberací 4. řádu. Metoda PRK ORK dokonce neindukuje žádné z těchto aberací. Zvýšení aberací u LASIK ORK je nejspíš způsobeno nářezem rohovkové lamely. I přesto je indukce aberací významně nižší než u LASIK standard.
9. U metody ORK nenastalo pooperační zvýšení komatických aberací a aberací 3. řádu, u PRK ORK nebylo zvýšení ani HO RMS, sférické aberace ani aberací 4. řádu.
10. Metoda ORK jednoznačně indukuje méně aberací po laserových zákrocích než metoda standard, a to jak u LASIK, tak u PRK. Snížení pooperačních hodnot aberací vyšších řádů vede ke zlepšení kvality vidění, snížení výskytu nežádoucích fenoménů a zvýšení spokojenosti pacientů.

14. Závěr

Laserová korekce refrakčních vad je v současné době považována za standardní chirurgickou metodu. Odstranění aberací nejen nižšího, ale i vyššího řádu vede ke zlepšení zrakové ostrosti pacientů, ale hlavně ke snížení rizika vedlejších zrakových fenomenů jako je halo nebo glare. V našem souboru jsme jednoznačně prokázali pozitivní přínos „individualizované ablace“, která neindukuje vznik aberací vyšších řádů, a to jak ve skupině LASIK, tak ve skupině PRK.

Za významnou považujeme i skutečnost, že podobná studie není v české literatuře popsána a předpokládáme, že publikace našich výsledků v zahraničí povede k dalšímu pochopení vlivu aberací vyšších řádů na výsledný vizus.

15. Seznam literatury

1. Agarwal A, Jakob S, Agarwal A: Aberropia: the discovery of a new refractive entity. *Ophthalmol Times Eur* 2007.
2. Alió JL, Artola A, Claramonte PJ et al.: Complications of photorefractive keratectomy for myopia: Two year follow-up of 3000 case. *J Cataract Refract Surg* 1998;24:619-26.
3. Alió JL, Montés-Mico R: Wavefront-Guided versus Standard LASIK Enhancement for Residual Refractive Errors. *Ophthalmology* 2006;113:191-7.
4. Applegate RA, Thibos LN, Hilmantel G: Optics of Aberroscopy and supervision. *J Cataract Refract Surg* 2001;27:1093-107.
5. Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V: Are All Aberrations Equal? *J Refract Surg* 2002;18:556-62.
6. Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, Server EJ: Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1487-1459.
7. Autrata R, Řehůřek J, Holoušová M: Fotorefrakční keratektomie při vysoké myopické anizometrii u dětí. *Čs Oftal* 1999;55:216-21.
8. Autrata R, Řehůřek J: Laser-assisted subepithelial keratectomy and photorefractive keratectomy versus conventional treatment of myopic anisometric amblyopia in children. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:74-84.
9. Binder PS, Koepnick RG: An advanced mikrokeratome design for LASIK and keratomileusis in situ. In: Pallikaris IG, Siganos DS: LASIK. Thorofare: SLACK Incorporated, 1997:57-65.
10. Brightbill FS: Corneal surgery. Theory, technique and tissue. St. Luis: Mosby, 1993:480-511.

11. Bühren J, Johnem T: Factors affecting the change in lower-order and higher-order aberrations after wavefront-guided laser in situ keratomileusis for myopia with the Zyoptix 3.1 system. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:1166-74.
12. Burakgazi AZ, Tinio B, Bababyan A, Niksarli KK, Asbell P: Higher Order Aberrations in Normal Eyes Measured With Three Different Aberrometers. *J Refract Surg* 2006;22:898-903.
13. Burrato L, Brint S, Ferrari M: Keratomileusis. In: Burrato L, Brint SF: *LASIK. Principles and techniques*. Thorofare: SLACK Incorporated, 1998:9-21.
14. Burrato L, Brint S, Ferrari M: Excimer laser photoablation: healing considerations. In: Burrato L, Brint SF: *LASIK. Principles and techniques*. Thorofare: SLACK Incorporated, 1998:69-72.
15. Burrato L, Ferrari M: Indications, techniques, results. Limits and complications of laser in situ keratomileusis. *Curr Opin Ophthalmol* 1997;8:59-66.
16. Carones F, Brancato R, Venturi E, Morico A: The corneal endothelium after myopic excimer laser photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 1994;112:920-4.
17. Carson CA, Taylor HR: Excimer Laser Treatment for High and Extreme Myopia. *Arch. Ophthalmol* 1995;113:431-6.
18. Durrie DS, Stahl JE, Schwendeman F: Alcon LADARWave Custom Cornea Retreatments. *J Refract Surg* 2005;21(6):804-7.
19. Farah SG, Azar DT, Gurdal CG, Wong J: Laser in situ keratomileusis: Literature review of developing technique. *J Cataract Refract Surg* 1998;24:989-1006.
20. Feuermannová A: Výsledky fotorefrakční keratektomie u střední myopie. Hradec Králové, 1998;7-11.

21. Feuermannová A, Komenda I, Rozsival P: Wavefront analýza – nový směr ve vyšetřování a léčbě refrakčních vad. In: Trendy soudobé oftalmologie, Praha: Galén, 2007;4:37-60.
22. Föester W, Clemens C, Brünig S, Magnago T, Elsner C, Krueger R: Steep central island after myopic photorefractive keratectomy. J Cataract Refract Surg 1998;24:899-904.
23. Gambato C, Girlando A, Moretto E et al.: Mitomycin C Modulation of Corneal Wound Healing after Photorefractive Keratectomy in Highly Myopic Eyes. Ophthalmology 2005;112:208-19.
24. Gimbel HV, Anderson Penno EE: LASIK komplikations. Preventions and management. Thorofare: Slack Incorporated, Thorofare 2001:261.
25. Helena MC, Baerveldt F, Kim WJ, Wilson SE: Keratocyte Apoptosis after Corneal Surgery. IOVS 1998;39:276-83.
26. Holzer MP, Sassenroth M, Auffarth GU: Reliability of Corneal and Total Wavefront Aberration Measurement With the SCHWIND Corneal and Ocular Wavefront Analyzers. J Refract Surg 2006;22:917-20.
27. Hořejší V, Bartůňková J: Základy imunologie. Praha: Triton, 1998:219.
28. Huang D, Arif M: Spot size and quality of scanning laser correction of higher-order wavefront aberrations. J Cataract Refract Surg 2002;28:407-16.
29. Hycl J: Excimerové lasery v oftalmologii. Čs Oftal 1990;46:453-62.
30. Hycl J: Excimerové lasery – klinické zkušenosti. Čs Oftal 1994;50:250-9.
31. Chalita MR, Krueger RR: Wavefront Technology. Contemporary Ophthalmology. A Biweek Publ Contin Med Educ Ophthalmol 2002;1(14):1-14.

32. Chalita MR, Finkenthal J, Xu M, Krueger RR: LADARWave Wavefront Measurement in Normal Eyes. *J Refract Surg* 2004;20:132-8.
33. Chalita MR, Chavala S, Xu M, Krueger RR: Wavefront analysis in post-LASIK eyes and its correlation with visual symptoms, refraction, and topography. *Ophthalmology* 2004;111:447-53.
34. Chung SH, Lee IS, Lee YG et al.: Comparison of higher-order aberrations after wavefront-guided laser in situ keratomileusis and laser-assisted subepithelial keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:779-84.
35. Kaufman SC, Kaufman HE: How has confocal microscopy helped us in refractive surgery? *Curr Opin Ophthalmol* 2006;17:380-8.
36. Knorz MC, Steiner HK, Wiesinger BB: Intrastromal excimer laser – corneal interaction. In: Pallikaris IG, Siganos DS: *LASIK*. Thorofare: SLACK incorporated 1998:33-8.
37. Kohnen T: Iatrogenic ectasia: Current knowledge, current measurements [editorial]. *J Cataract Refract Surg* 2002;28:2065-6.
38. Kohnen T, Bühren J, Kuhne C, Mirshahi A: Wavefront-Guided LASIK with the Zyoptix 3.1 System for the Correction of Myopia and Compound Myopic Astigmatism with 1-Year Follow-up. *Ophthalmology* 2004;111:2175-85.
39. Kohnen T: Classification of excimer laser profiles. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:543-4.
40. Koch DD: The riddle of iatrogenic ectasia [editorial]. *J Cataract Refract Surg* 1999;25:453-4.
41. Koch DC: Introduction to Wavefront Technology. *Rev Ophthalmol* October 2001;99-106.

42. Kremer I, Shochot Y, Kaplan A, Blumenthal M: Three year results of photoastigmatic refractive keratectomy for mild and atypical keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 1998;24:1581-8.
43. Kymionis GD, Tsiklis NS, Astyrakakis N et al.: Eleven-year follow-up of laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2007;33:191-6.
44. Lacayo GO, Majmudar PA: How and when to use mitomycin-C in refractive surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 2005;16:256-9.
45. Lahners WJ, Hardten DR, Lindstrom RL: Peripheral keratitis following laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg* 2003;19:671-5.
46. Laplace O, Bourcier T, Chaumeil Ch et al.: Early bacterial keratitis after laser-assisted subepithelial keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:2638-40.
47. Lee DH, Oh RJ, Reinstein DZ: Conservation of corneal tissue with wavefront-guided laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2003;31:1153-8.
48. Lee DH, Sung Chung H, Jeon YC et al.: Photorefractive keratectomy with intraoperative mitomycin-C application. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:2293-8.
49. Levy Y, Segal O, Avni I, Zadok D: Ocular Higher-order Aberrations in Eyes With Supernormal Vision. *Am J Ophthalmol* 2005;139:225-8.
50. Lorencová V, Rozsival P, Feuermannová A, Urmínský J: Dlouhodobé výsledky refrakčních operací excimerovým laserem. In: *Trendy soudobé oftalmologie*. Praha: Galén, 2006;3:99-112.
51. Loughnan MS, Robinson D, Sullivan L: Mechanical methods in refractive corneal surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 1996;6:41-6.
52. Majmudar PA, Forstot SL, Dennis RF et al.: Topical mitomycin-C for subepithelial fibrosis after refractive corneal surgery. *Ophthalmology* 2000;107:89-94.

53. Malecaze F, Couillet J, Fournié P et al.: Corneal Ectasia after Photorefractive Keratectomy for Low Myopia. *Ophthalmology* 2006;113:742-6.
54. Manche EE, Maloney RK, Smith RJ: Treatment of topographic central island following refractive surgery. *J Cataract Surg* 1998;24:464-70.
55. May CA, Priglinger SG, Neubauer AS et al.: Laser in situ keratomileusis in human corneas: new organ culture model. *J Cataract Refract Surg* 2004;30:179-86.
56. McGhee ChNJ, Bryce IG: Natural history of central topographic island following excimer laser photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 1996;22:1151-8.
57. McGhee ChNJ, Taylor HR, Gartry DS, Trokel ST: Excimers lasers in ophthalmology. *Principles and practise*. London: M. Dunitz, 1997:453.
58. Melamud A, Chalita MR: Comatic aberration as a cause of monocular diplopia. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:529-32.
59. Meyer JC, Stulting RD, Thompson KP, Durrie DS: Late Onset of Corneal Scar After Excimer Laser Photorefractive Keratectomy. *Am J Ophthalmol* 1996;121:529-39.
60. Mietz H, Severin M, Seifert P et al.: Acute Corneal Necrosis after Excimer Laser Keratectomy for Hyperopia. *Ophthalmology* 1999;106:490-6.
61. Mitooka K, Ramirez M, Maguire LJ et al.: Keratocyte Density of Central Human Cornea After Laser In Situ Keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 2002;133:307-14.
62. Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Seiler T: Increased higher-order optical aberrations after laser refractive surgery; a problem of subclinical decentration. *J Cataract Refract Surg* 2001;27:362-9.

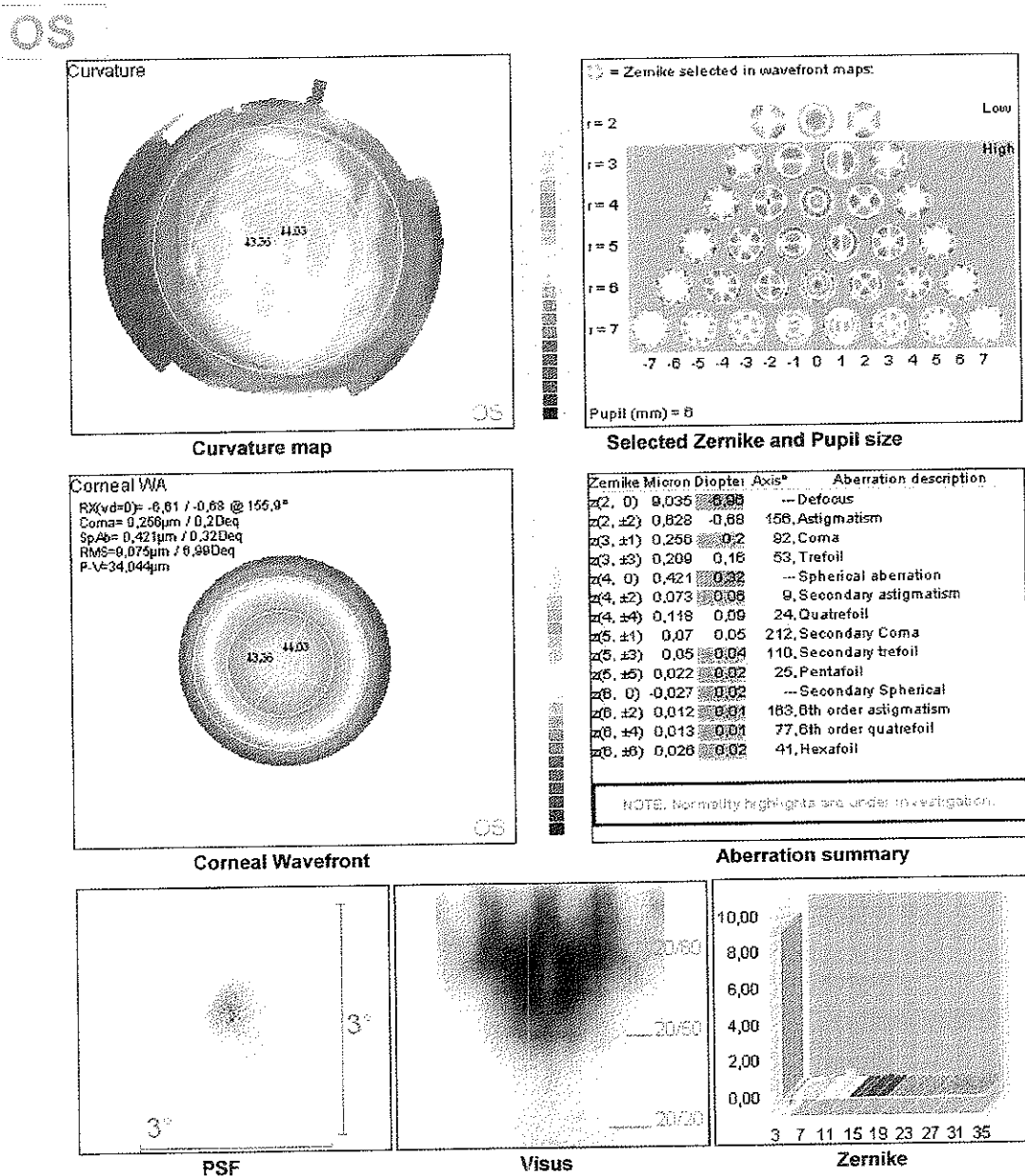
63. Nano HD, Muzzin S, Irigarary FL: Excimer laser photorefractive keratectomy in pediatric patients. *J Cataract Refract Surg* 1997;23:736-9.
64. Netto MV, Ambrósio R, Shen TT, Wilson SE: Wavefront Analysis in Normal Refractive Surgery Candidates. *J Refract Surg* 2005;21:332-8.
65. Nishida T, Tanaka T: Extracellular matrix and growth factors in corneal wound healing. *Curr Opin Ophthalmol* 1996;7:2-11.
66. Novák P: Současný pohled na problematiku refrakční chirurgie. In: *Trendy soudobé oftalmologie*. Praha: Galén, 2000;1:83-94.
67. Nuijts RMMA, Nabar VA, Hament WJ, Eggink FAGJ: Wavefront-guided versus standard laser in situ keratomileusis to correct low to moderate myopia. *J Cataract Refract Surg* 2002;28:1907-13.
68. Osika T, Miyata K, Tokunaga T et al.: Higher order wavefront aberrations of cornea and magnitude of refractive correction in laser in situ keratomileusis. *Ophthalmology* 2002;109(6):1154-8.
69. Pallikaris IG: Historical evolution of LASIK. In: *Pallikaris IG, Siganos DS: LASIK*. Thorofare: SLACK Incorporated, 1998:384.
70. Pallikaris IG, Kymionis GD, Astyrakakis NI: Corneal ectasia induced by laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2001;27:1796-1802.
71. Pallikaris IG, Kymionis GD, Panagopoulou SI et al.: Induced optical aberrations following formation of a laser in situ keratomileusis flap. *J Cataract Refract Surg* 2002;28:1737-41.
72. Pavlou F: Wavefront technologies. *Ophthalmol Times Eur* 2006;2:16-7.
73. Paysse EA, Bowes Hamill M, Hussein MAW, Koch DD: Photorefractive Keratectomy for Pediatric Anisometropia: Safety and Impact on Refractive Error, Visual Acuity, and Stereopsis. *Am J Ophthalmol* 2004;138:70-8.

74. Piebenga LW, Matta CS, Deitz MR et al.: Excimer Photorefractive Keratectomy for Myopia. *Ophthalmology* 1993;100(9):1335-45.
75. Piovella M, Camesasca FI, Fattoni C: Excimer Laser Photorefractive Keratectomy for High Myopia. Four-year Experience with a Multiple Zone Technique. *Ophthalmology* 1997;104(10):1554-65.
76. Pop M, Aras M: Photorefractive Keratectomy Retreatments for Regression. One-year Follow-up. *Ophthalmology* 1996;103:1979-84.
77. Puliafito CA, Steiner RF, Deutsch TF: Excimer laser ablation the cornea and the lens. *Ophthalmology* 1985;92:741-8.
78. Rajan MS, Jaycock P, O'Brart D at al.: A Long-term Study of Photorefractive Keratectomy. 12-Year follow-up. *Ophthalmology* 2004;111:1813-24.
79. Rozsival P, Feuermannová A: Retreatment after Photorefractive Keratectomy for Low Myopia. *Ophthalmology* 1998;105:1189-93.
80. Salmo TO, van de Pol C: Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:2064-74.
81. Seiler T, McDonnell PJ: Excimer laser photorefractive keratectomy. *Surv Ophthalmol* 1995;40:89-118.
82. Seiler T: Refractive corneal surgery with lasers. *Curr Opin Ophthalmol* 1996;7:47-51.
83. Seiler T: Iatrogenic keratectasis: academic anxiety or serious risk? [editorial]. *J Cataract Refract Surg* 1999;25:1307-8.
84. Seiler T, Koufala K, Richter G: Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg* 1998;14:312-7.

85. Seiler T, Quurke AW: Iatrogenic keratectasia after LASIK in a case of forme fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 1998;24:1007-9.
86. Seiler T, Kaemmer M, Mierdel P, Krinke HE: Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol* 2000;118:17-21.
87. Seitz B, Rozsival P, Feuermannová A et al.: Penetrating keratoplasty for iatrogenic keratoconus after repeat myopic laser in situ keratomileusis: Histologic findings and literature review. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:2217-24.
88. Sekundo W, Bönicke K, Mattausch P, Wiegand W: Six-year follow-up of laser in situ keratomileusis for moderate and extreme myopia using a first-generation excimer laser and mikrokeratome. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1152-8.
89. Sher NA, Hardten DR, Fundingsland B et al.: 193-nm Excimer Photorefractive Keratectomy in High Myopia. *Ophthalmology* 1994;101:1575-82.
90. Schwiegerling J, Snyder RW: Corneal ablation patterns to correct for spherical aberration in photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2000;26:214-21.
91. Smith RJ, Maloney RK: Diffuse lamellar keratitis: a new syndrome in lamellar refractive surgery. *Ophthalmology* 1998;105:1721-6.
92. Smith RJ, Maloney RK: Laser in situ keratomileusis in patients with autoimmune diseases. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:1292-5.
93. Stein HA, Cheskers A, Stein RM: The excimer. Fundamental and clinical use. Thorofare: Slack Incorporated, 1995:203.
94. Stodůlka P, Vaculík J, Lichnovský V: Měření adheze rohovkové lamely ke stromatu v závislosti na době od operace LASIK. *Čs Oftal* 1999;55:222-5.

95. Talley AR, Hardten DR, Sher NA et al.: Result One Year After Using the 193-nm Excimer Laser for Photorefractive Keratectomy in Mild to Moderate Myopia. *Am J Ophthalmol* 1994;118(3):304-11.
96. Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT et al.: Standards for Reporting the Optical Aberrations of Eyes. *J Refract Surg* 2002;18:652-60.
97. Tuan KA: Visual experience and patient satisfaction with wavefront-guided laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2006;32:577-83.
98. Vinciguerra PC, Camesasca FI, Calossi A: Statistical analysis of physiological aberrations of the Cornea. *J Refract Surg* 2003;19:265-9.
99. Wang L, Douglas D, Koch D: Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1896-903.
100. Wang L, Koch DD: Anterior corneal optical aberrations induced by laser in situ keratomileusis for hyperopia. *J Cataract Refract Surg* 2003;29:1702-8.
101. Williams D, Yoon GY, Potter J et al.: Visual benefit of correcting high order aberrations of the eye. *J Refract Surg* 2000;16:554-9.
102. Wilson SE: Molecular cell biology for the refractive corneal surgeon: Programmed cell death and wound healing. *J Refract Surg* 1997;13:171-5.
103. Wilson SE, Kim WJ: Keratocyte Apoptosis: Implications on Corneal Wound Healing, Tissue Organization, and Disease. *IOVS* 1998;39:220-6.
104. Wu HK, Demers PE: Photorefractive keratectomy for myopia. *Ophthalmol Surg Lasers*, 1996;27:29-44.
105. Zhou Ch, Jin M, Wang X, Ren Q: Corneal Wavefront-guided Ablation With the Schwind ESIRIS Laser for Myopia. *J Refract Surg* 2007;23:573-80.

16. Přílohy

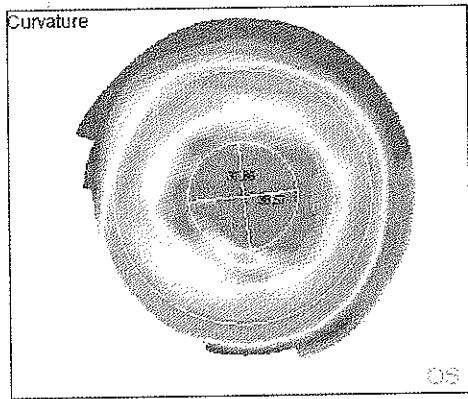


Příloha 1: Předoperační wavefront mapa, pacient 26 let.

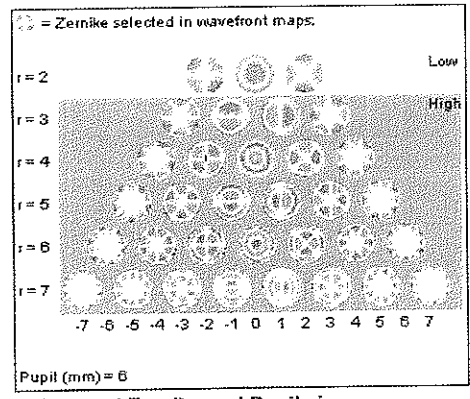
VOL 1,0 s -6,5 = -0,75 cyl 155°
 operace LASIK standard

Před operací jsou přítomny vyšší hodnoty aberací až do pátého řádu.

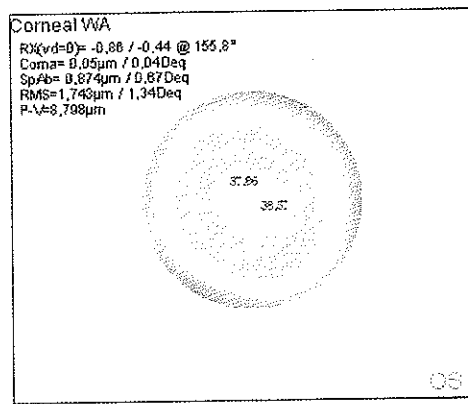
OS



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size

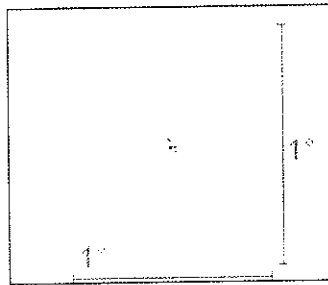


Corneal Wavefront

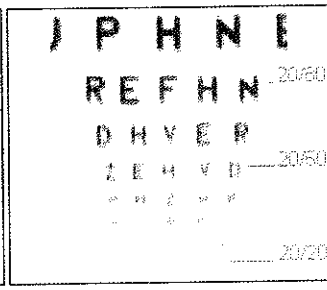
Zernike	Micron	Diopter	Axis*	Aberration description
$z(2, 0)$	1,403	1,08		--- Defocus
$z(2, \pm 2)$	0,403	0,34		156, Astigmatism
$z(3, \pm 1)$	0,05	0,04		53, Coma
$z(3, \pm 3)$	0,182	0,14		83, Trefoil
$z(4, 0)$	0,874	0,67		--- Spherical aberration
$z(4, \pm 2)$	0,226	0,17		170, Secondary astigmatism
$z(4, \pm 4)$	0,211	0,16		27, Quatrefoil
$z(5, \pm 1)$	0,019	0,01		271, Secondary Coma
$z(5, \pm 3)$	0,011	0,01		80, Secondary trefoil
$z(5, \pm 5)$	0,067	0,05		54, Pentafoil
$z(6, 0)$	-0,013	0,01		--- Secondary Spherical
$z(6, \pm 2)$	0,041	0,03		70, 6th order astigmatism
$z(6, \pm 4)$	0,015	0,01		70, 6th order quatrefoil
$z(6, \pm 6)$	0,051	0,04		28, Hexafoil

NOTE: Normality highlights are underlined in original image.

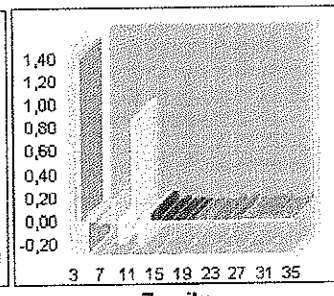
Aberration summary



PSF



Visus



Zernike

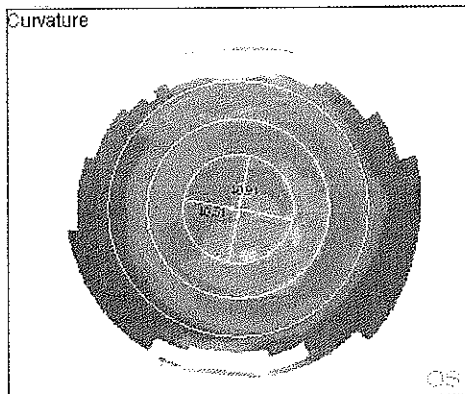
Příloha 2: Wavefront mapa stejného pacienta 3 měsíce po operaci.

VOL 1,0 nat.

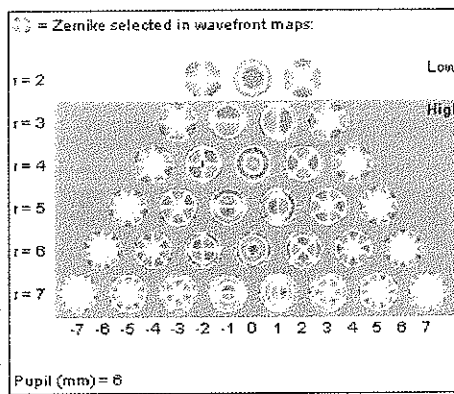
refraktometr 0,5 = -0,25 cyl 49°

Po zákroku dochází ke zvýšení aberací čtvrtého řádu, zejména sférické aberace na dvojnásobek.

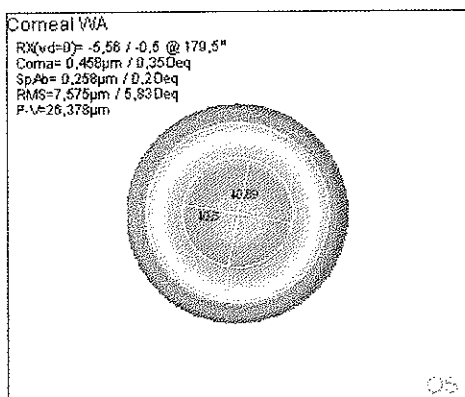
OS



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size

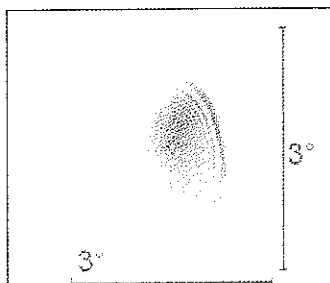


Corneal Wavefront

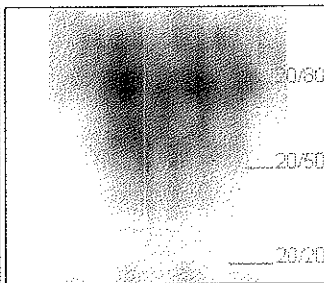
Zernike	Micron	Dioptr	Axis*	Aberration description
z(2, 0)	7,542	5,81		-- Defocus
z(2, ±2)	0,458	0,35		179, Astigmatism
z(3, ±1)	0,458	0,35		137, Coma
z(3, ±3)	0,1	0,08		60, Trefoil
z(4, 0)	0,258	0,2		-- Spherical aberration
z(4, ±2)	0,014	0,01		135, Secondary astigmatism
z(4, ±4)	0,028	0,02		83, Quatrefoil
z(5, ±1)	0,03	0,02		238, Secondary Coma
z(5, ±3)	0,026	0,02		13, Secondary trefoil
z(5, ±5)	0,011	0,01		14, Pentafoil
z(6, 0)	-0,018	0,01		-- Secondary Spherical
z(6, ±2)	0,011	0,01		188, 6th order astigmatism
z(6, ±4)	0,006	0,01		33, 6th order quatrefoil
z(6, ±6)	0,03	0,02		46, Hexafoil

NOTE: Normality highlights are under investigation

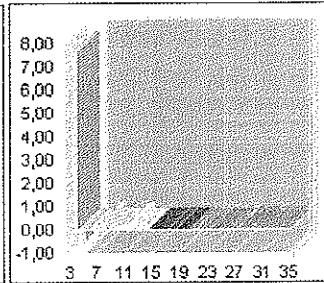
Aberration summary



PSF



Visus

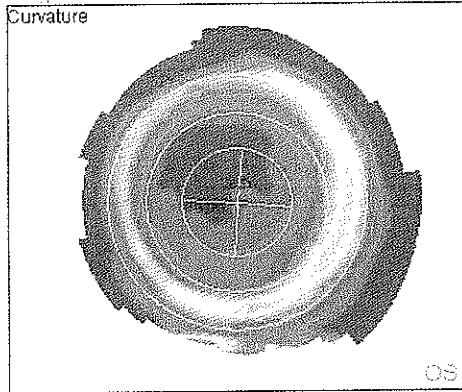


Zernike

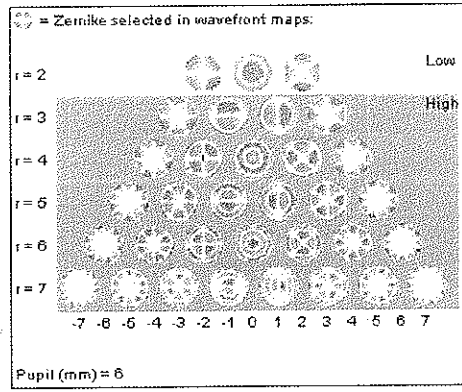
Příloha 3: Předoperační wavefront mapa, pacient 37 let.
 VOL 1,0 s -6,0 sf,
 operační zákrok LASIK ORK

Před zákrokem zvýšená koma a sférická aberace.

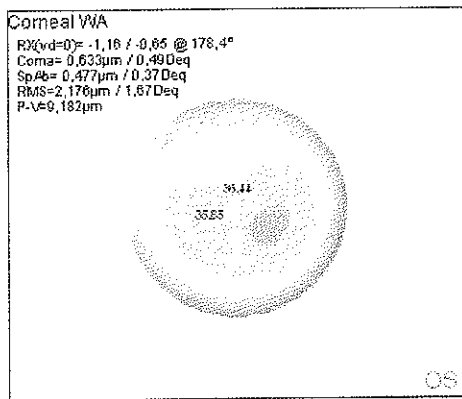
OS



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size



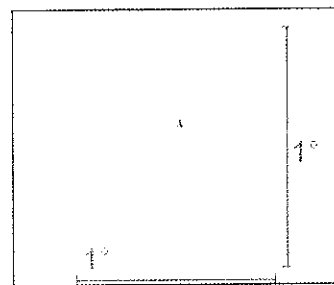
Corneal Wavefront

Corneal WVA
 Rx(vd=0) = -1,18 / -0,65 @ 178,4°
 Coma = 0,633µm / 0,490Deq
 SpAb = 0,477µm / 0,37Deq
 RMS = 2,176µm / 1,67Deq
 P-V = 9,162µm

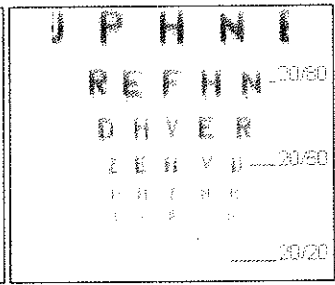
Zernike	Micron	Diopter	Axis°	Aberration description
Z(2, 0)	1,929	-1,95		-- Defocus
Z(2, ±2)	0,597	-0,65	178	Astigmatism
Z(3, ±1)	0,833	0,49	126	Coma
Z(3, ±3)	0,082	0,09		53, Trefoil
Z(4, 0)	0,477	0,37		-- Spherical aberration
Z(4, ±2)	0,11	0,09		89, Secondary astigmatism
Z(4, ±4)	0,04	0,03		79, Quatrefoil
Z(5, ±1)	0,017	0,01		213, Secondary Coma
Z(5, ±3)	0,04	0,03		18, Secondary trefoil
Z(5, ±5)	0,02	0,02		19, Pentafoil
Z(6, 0)	0,039	0,03		-- Secondary Spherical
Z(6, ±2)	0,03	0,02		3, 6th order astigmatism
Z(6, ±4)	0,015	0,01		40, 6th order quatrefoil
Z(6, ±6)	0,007	0,01		50, Hexafoil

NOTE: Normally, highlights are under investigation

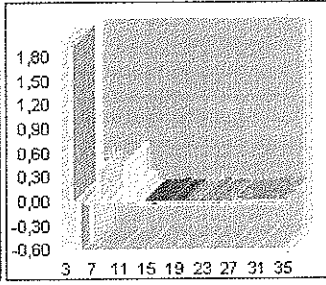
Aberration summary



PSF



Visus

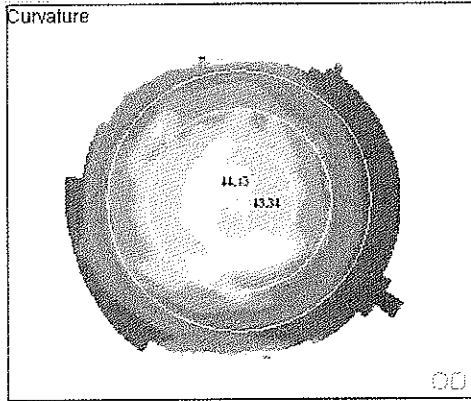


Zernike

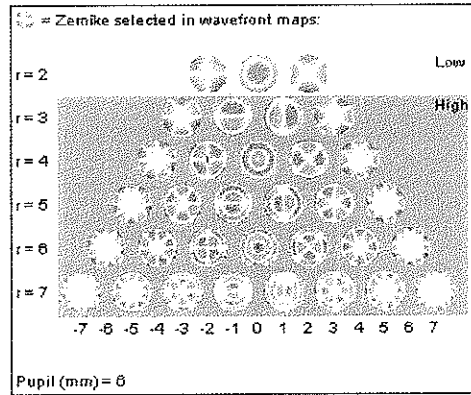
Příloha 4: Wavefront mapa stejného pacienta 3 měsíce po operaci.
 VOL 1,2 nat.
 refraktometr -0,5 = -0,5 cyl 2°

Po zákroku se lehce zvyšuje hodnota komy a sférická aberace. Na rozdíl od předchozího pacienta je však zvýšení hodnoty sférické aberace podstatně menší. V tomto případě má SA hodnotu 0,477 µm (0,37 D), u předchozího pacienta je to 0,974 µm (0,67 D).

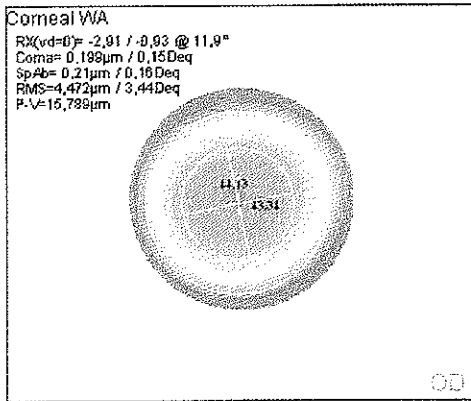
OD



Curvature map



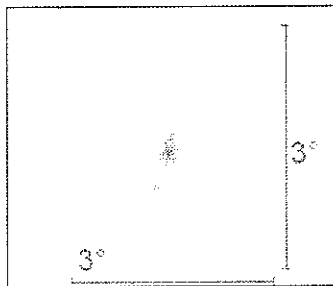
Selected Zernike and Pupil size



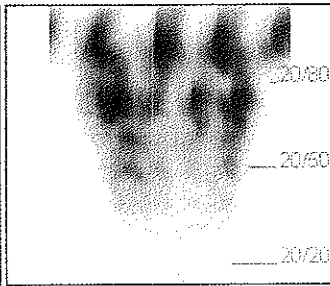
Corneal Wavefront

Zernike	Micron	Diopter	Axis°	Aberration description
$Z(2, 0)$	4,378	-3,37		-- Defocus
$Z(2, \pm 2)$	0,954	-0,93		12, Astigmatism
$Z(3, \pm 1)$	0,199	0,15		3, Coma
$Z(3, \pm 3)$	0,112	0,09		28, Trefoil
$Z(4, 0)$	0,21	0,16		-- Spherical aberration
$Z(4, \pm 2)$	0,053	0,04		111, Secondary astigmatism
$Z(4, \pm 4)$	0,025	0,02		85, Quatrefoil
$Z(5, \pm 1)$	0,011	0,01		40, Secondary Coma
$Z(5, \pm 3)$	0,033	0,03		109, Secondary trefoil
$Z(5, \pm 5)$	0,021	0,02		18, Pentafol
$Z(6, 0)$	-0,014	0,01		-- Secondary Spherical
$Z(6, \pm 2)$	0,019	0,01		162, 6th order astigmatism
$Z(6, \pm 4)$	0,005	0,00		34, 6th order quatrefoil
$Z(6, \pm 6)$	0,015	0,01		40, Hexafol

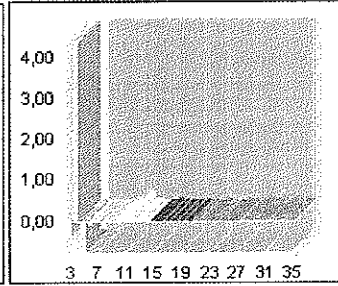
Aberration summary



PSF



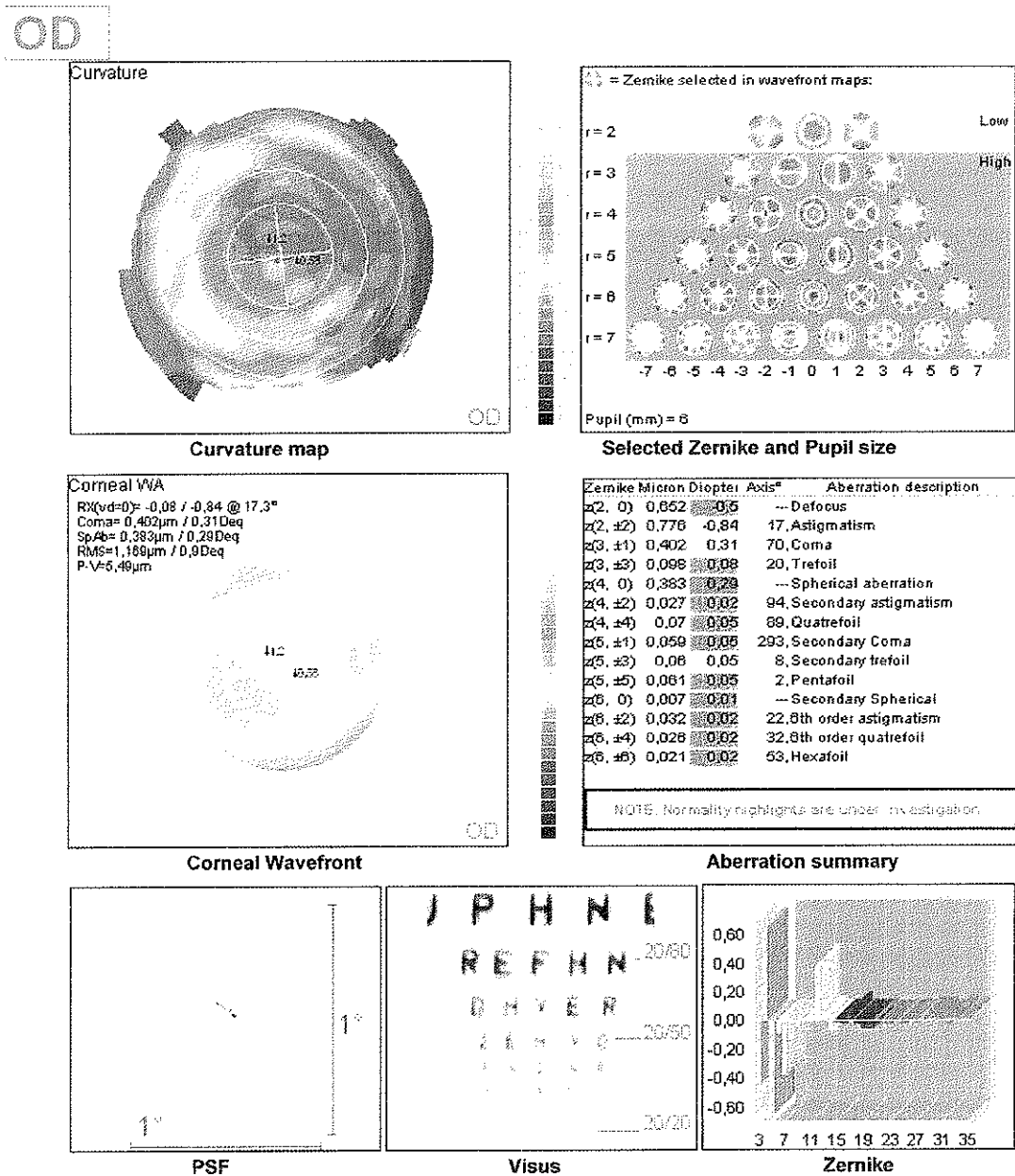
Visus



Zernike

Příloha 5: Předoperační wavefront mapa, pacient 34 let.
 VOP 1,0 s -2,75 = -0,75 cyl 20°
 operační zákrok PRK standard

Před zákrokem pouze mírně zvýšená sférická aberace.



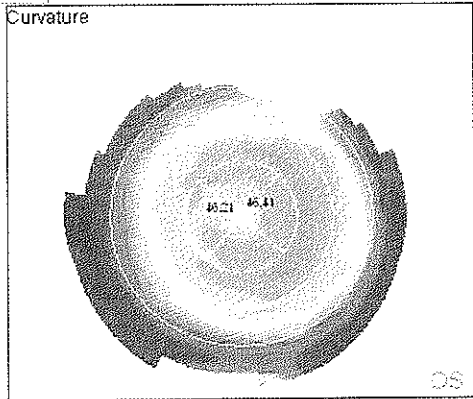
Příloha 6: Wavefront mapa stejného pacienta 6 měsíců po operaci.

VOP 1,0 nat.

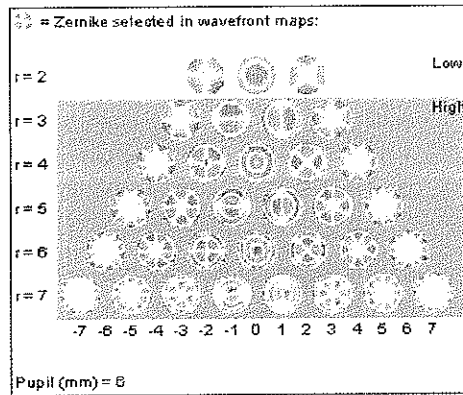
refraktometr -0,25 = -0,75 cyl 4°

Po zákroku dochází ke zvýšení komy, sférické aberace a sekundárního trefoilu.

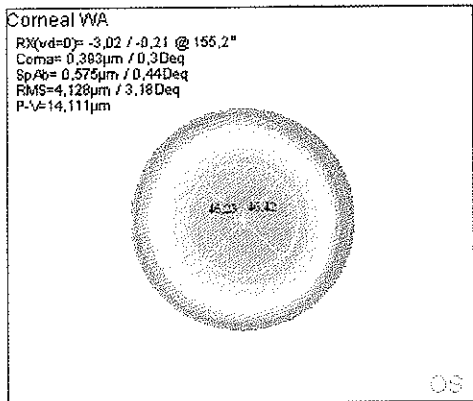
OS



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size

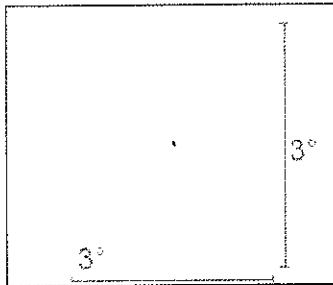


Corneal Wavefront

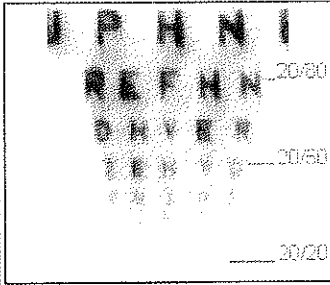
Zernike	Micron	Diopter	Axis°	Aberration description
$Z(2, 0)$	4,062	-3,13		--- Defocus
$Z(2, \pm 2)$	0,191	0,21		155, Astigmatism
$Z(3, \pm 1)$	0,393	0,3		178, Coma
$Z(3, \pm 3)$	0,058	0,09		79, Trefoil
$Z(4, 0)$	0,575	0,49		--- Spherical aberration
$Z(4, \pm 2)$	0,077	0,09		67, Secondary astigmatism
$Z(4, \pm 4)$	0,021	0,02		6, Quatrefoil
$Z(5, \pm 1)$	0,027	0,02		209, Secondary Coma
$Z(5, \pm 3)$	0,026	0,02		109, Secondary trefoil
$Z(5, \pm 5)$	0,035	0,09		21, Pentafoil
$Z(6, 0)$	-0,092	0,07		--- Secondary Spherical
$Z(6, \pm 2)$	0,009	0,01		124, 6th order astigmatism
$Z(6, \pm 4)$	0,017	0,01		87, 6th order quatrefoil
$Z(6, \pm 6)$	0,003	0,		49, Hexafoil

NOTE: Normality highlights are under investigation

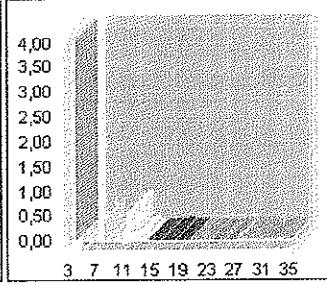
Aberration summary



PSF



Visus



Zernike

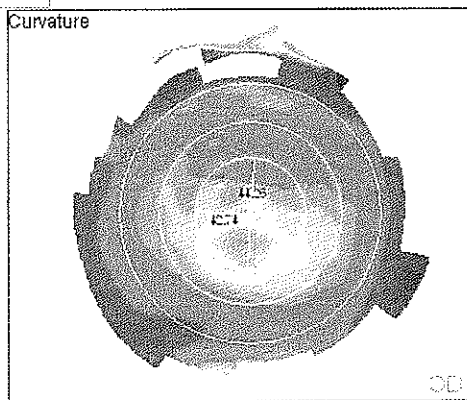
Příloha 7: Předoperační wavefront mapa, pacient 39 let.

VOP 1,2 s -2,0 sf

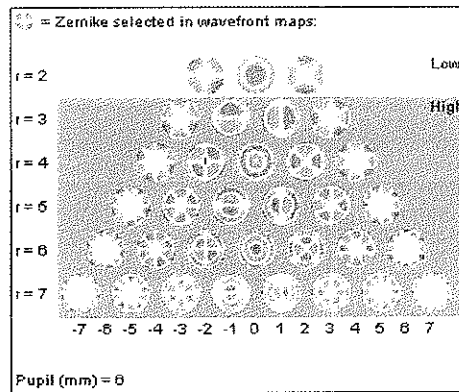
operační zákrok PRK ORK

Před zákrokem je zvýšená koma, sférická aberace a sekundární sférická aberace.

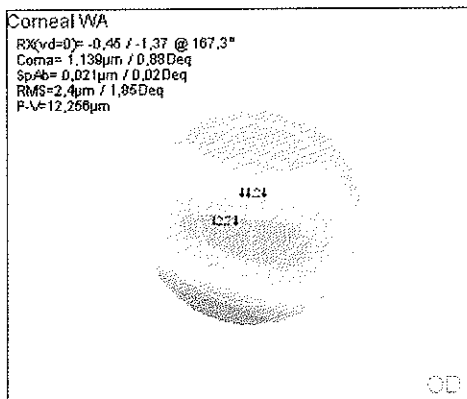
OD



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size

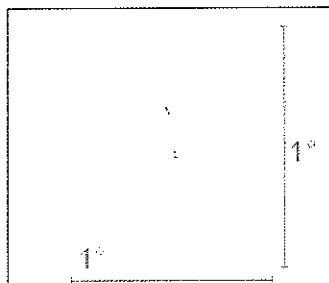


Corneal Wavefront

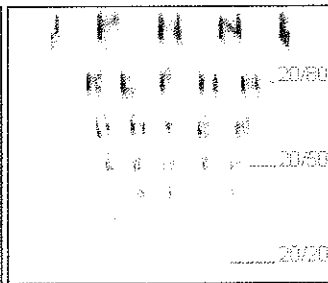
Zernike	Micron	Diopter	Axis ^o	Aberration description
z(2, 0)	1,472	-1,18		Defocus
z(2, ±2)	1,262	-1,37	167	Astigmatism
z(3, ±1)	1,139	0,88	86	Coma
z(3, ±3)	0,721	0,50	71	Trefoil
z(4, 0)	0,021	0,02		Spherical aberration
z(4, ±2)	0,285	0,22	78	Secondary astigmatism
z(4, ±4)	0,128	0,1	21	Quatrefoil
z(5, ±1)	0,228	0,18	280	Secondary Coma
z(5, ±3)	0,173	0,13	14	Secondary trefoil
z(5, ±5)	0,014	0,01	10	Pentafoil
z(6, 0)	0,008	0,01		Secondary Spherical
z(6, ±2)	0,025	0,02	13	6th order astigmatism
z(6, ±4)	0,035	0,03	67	6th order quatrefoil
z(6, ±6)	0,018	0,01	4	Hexafoil

NOTE: Normality highlights are under investigation

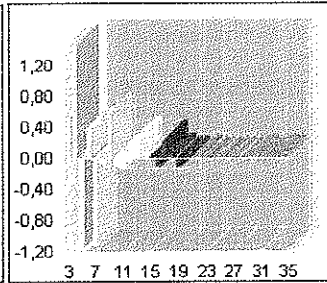
Aberration summary



PSF



Visus



Zernike

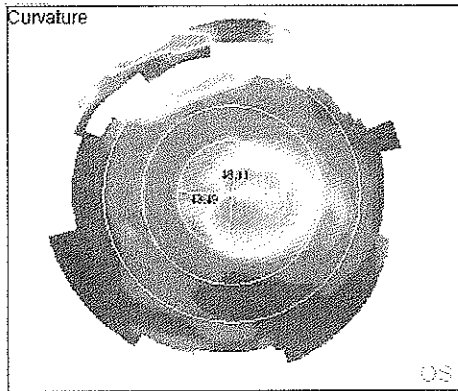
Příloha 9: Wavefront mapa při keratokonu, pacient 30 let.

VOP 0,9 nat.

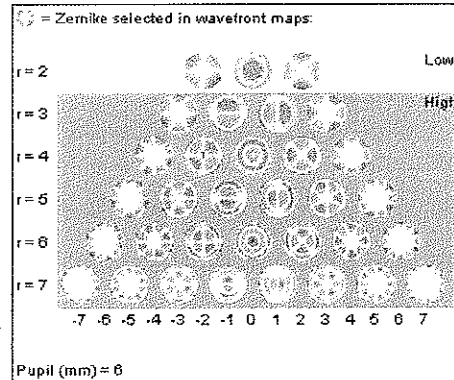
1,0 s -1,25 cyl 155°

Pro zajímavost uvádíme i wavefront mapu pacienta s mírným keratokonem. Pacient má dobrý vizus i při patrném zvýšení hodnot aberací vyšších řádů.

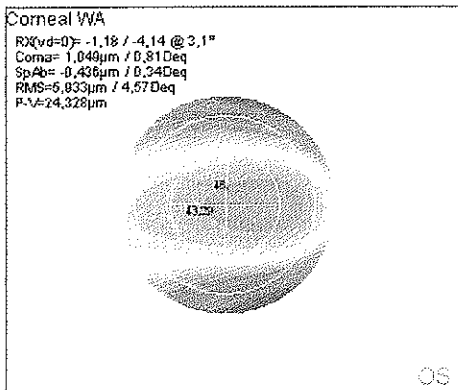
OS



Curvature map



Selected Zernike and Pupil size

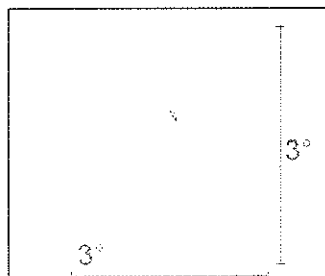


Corneal Wavefront

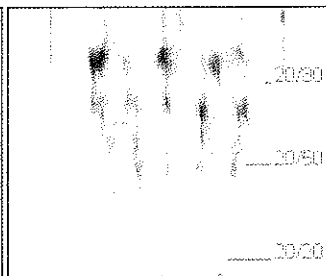
Zernike	Micron	Diopter	Axis°	Aberration description
$z(2, 0)$	4,216	-3,25		-- Defocus
$z(2, \pm 2)$	3,8	-4,14		3, Astigmatism
$z(3, \pm 1)$	1,040	0,81		181, Coma
$z(3, \pm 3)$	0,812	0,62		115, Trefoil
$z(4, 0)$	-0,436	0,34		-- Spherical aberration
$z(4, \pm 2)$	0,9	0,69		90, Secondary astigmatism
$z(4, \pm 4)$	0,35	0,27		87, Quatrefoil
$z(5, \pm 1)$	0,15	0,12		343, Secondary Coma
$z(5, \pm 3)$	0,212	0,16		53, Secondary trefoil
$z(5, \pm 5)$	0,058	0,04		63, Pentafol
$z(6, 0)$	0,078	0,06		-- Secondary Spherical
$z(6, \pm 2)$	0,141	0,11		176, 6th order astigmatism
$z(6, \pm 4)$	0,062	0,05		39, 6th order quatrefoil
$z(6, \pm 6)$	0,036	0,03		48, Hexafol

NOTE: Normality highlights are under investigation.

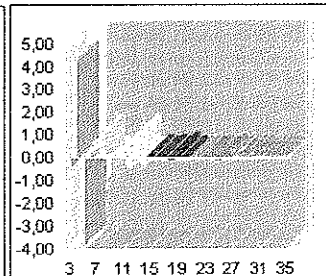
Aberration summary



PSF



Visus



Zernike

Příloha 10: Wavefront mapa při keratokonu, pacient 30 let.

VOL 0,2 nat.

0,7 s -1,5 = -4,5 cyl 175°

Na horším oku stejného pacienta jsou vysoké hodnoty téměř všech aberací. Korekci sféry a cylindru lze vizus částečně zlepšit, ale přítomnost aberací vyšších řádů způsobuje takovou alteraci obrazu, kterou nelze sféro-cylindrickými skly korigovat.